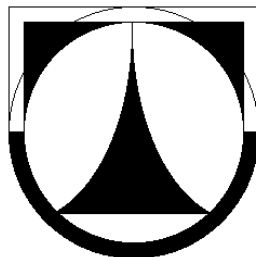


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ
KATEDRA NETKANÝCH TEXTILÍ



Diplomová práce

VÝVOJ OPTICKÉ METODY STANOVENÍ REZONANČNÍ
FREKVENCE MEMBRÁNY

DEVELOPEMENT OF OPTICAL METHOD FOR
MEMBRANE RESONANT FREQUENCY DETERMINATION

LIBEREC 2008

JIŘINA HOVORKOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ

**VÝVOJ OPTICKÉ METODY STANOVENÍ REZONANČNÍ
FREKVENCE MEMBRÁNY**

**DEVELOPEMENT OF OPTICAL METHOD FOR
MEMBRANE RESONANT FREQUENCY DETERMINATION**

Autor diplomové práce: Jiřina Hovorková

Vedoucí diplomové práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Rozsah práce:

stran	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
66	30	4	31	4

V Liberci dne 20. prosince 2008

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra netkaných textilií

Akademický rok: **2007 - 2008**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro: **Jiřinu Hovorkovou**

obor: 3106-T004 Netkané textilie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Vývoj optické metody stanovení rezonanční frekvence membrány**

Zásady pro vypracování :

- 1) prostudujte teoretické poznatky o rezonančním chování membrán, fólií a vláknenných materiálů
- 2) připravte sérii vzorků: nanovláknenné membrány různých plošných hmotností
- 3)
 - a) vypracujte metodu pro stanovení rezonanční frekvence membrány
 - b) stanovte rezonanční frekvence membrány v závislosti na plošné hmotnosti vzorků
- 4) diskutujte závěry
 - a) vyhodnocení metody
 - b) vliv plošné hmotnosti vzorků na rezonanční frekvence membrány

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 20. prosince 2008

.....

Podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Kláře Kalinové, Ph.D., za její rady, připomínky a trpělivost při vzniku této práce. Dále p. Filipu Sanetníkovi, Ing. Pavlu Pokornému, Ing. Aleši Cvrkalovi za pomoc při realizaci experimentů, VÚTS a. s. za zapůjčení kamery Olympus i-speed3, Ing. Jiřímu Kulovi a Ing. Martinu Kroulovi za rady při zpracování obrazového záznamu. Děkuji své rodině za veškerou podporu během studia.

Vývoj optické metody stanovení rezonanční frekvence membrány

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vývojem optické metody pro stanovení rezonanční frekvence membrány. První část obsahuje souhrn teoretických poznatků o zvuku a jeho pohlcování s důrazem na konstrukce založené na principu rezonance. Další část práce se věnuje popisu vyvíjené metody a měřícího zařízení a postupu provedeního experimentu. Na základě měření je vyhodnocen vliv různých plošných hmotností membrán na hodnoty rezonanční frekvence.

Klíčová slova: nanovláknenná membrána, pohlcování zvuku, rezonanční systém.

Development of optical method for membrane resonant frequency determination

Annotation

This thesis deals with the development of optical method for membrane resonant frequency determination. The first part of this paper contains summary of theoretical knowledge of sound and its absorption with emphasis on constructions based on resonant frequency principle. The second part is concerned with the description of the developed method and testing device and experiment. On the basis of the measurements, influence of different area density on resonant frequency is evaluated.

Key words: nanofibres membrane, sound absorption, resonance system.

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1.	ÚVOD DO TEORIE ZVUKU	13
2.1.1.	Základní pojmy akustiky	14
2.2.	ZVUK JAKO MECHANICKÉ VLNĚNÍ	16
2.3.	REZONANCE	17
2.3.1.	Rezonance mechanického oscilátoru	18
2.4.	MECHANISMUS POHLCOVÁNÍ ZVUKU	19
2.4.1.	Činitel zvukové pohltivosti	20
2.5.	KONSTRUKCE NA POHLCOVÁNÍ ZVUKU	22
2.5.1.	Pohltivé konstrukce z pórovitých materiálů	22
2.5.2.	Pohltivé konstrukce založené na rezonančním principu	22
2.5.2.1.	Kmitající membrány	24
2.5.2.2.	Kmitající desky	26
2.5.2.3.	Rezonátory Helmholtzova typu	27
2.6.	TEORIE VÝROBY NETKANÝCH TEXTILÍ	28
2.6.1.	Technologie výroby netkaných textilií	28
2.6.2.	Elektrostatické zvlákňování	29
2.6.2.1.	Princip elektrostatického zvlákňování	29
2.6.2.2.	Metoda „Nanospider“	30
2.6.3.	Polyvinylalkohol	31
2.7.	METODY PRO URČOVÁNÍ Činitele zvukové pohltivosti a rezonanční frekvence	32
3	METODA	39
3.1.	PRINCIP	39
3.2.	ZAŘÍZENÍ	39
3.2.1.	Trubice	41
3.2.2.	Digitální vysokorychlostní kamerový systém	42
3.3.	ZPRACOVÁNÍ OBRAZOVÉHO ZÁZNAMU	44
4	EPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	49
4.1.	CÍL	49
4.2.	ÚKOLY	49
4.3.	VÝROBA VZORKŮ	49
4.3.1.	Označování vzorků	51
4.4.	POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	51
4.5.	POSTUP EXPERIMENTU	52
4.6.	VÝSLEDKY EXPERIMENTU A VYHODNOCENÍ	52
5	ZÁVĚR	57

6	LITERATURA.....	59
7	SEZNAM PŘÍLOH.....	62
	PŘÍLOHA Č. 1	63
	PŘÍLOHA Č. 2	64
	PŘÍLOHA Č. 3	65
	PŘÍLOHA Č. 4	66

Seznam symbolů

a	[m]	délka desky
a_i	[-]	koeficient pro výpočet rezonančních frekvencí
b	[m]	šířka desky
c	[m.s ⁻¹]	rychlost šíření zvuku prostředím
c_M	[m.s ⁻¹]	rychlost příčné vlny šířící se na membráně
C	[m.N ⁻¹]	akustická poddajnost
d	[m]	tloušťka vzduchové vrstvy
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
f	[Hz]	frekvence zvuku
f_r	[Hz]	rezonanční (vlastní) frekvence
F_r	[N]	celková napínací síla
h	[m]	tloušťka desky
I	[W.m ⁻²]	intenzita zvuku
I₀	[W.m ⁻²]	prahová hodnota intenzity zvuku
k_M	[m ⁻¹]	vlnové číslo
L	[dB]	hladina intenzity zvuku
m	[kg]	hmotnost
m₁	[kg.m ⁻²]	plošná hmotnost homogenní elasticke membrány
p_a	[Pa]	akustický tlak
P	[W]	akustický výkon
q	[m ³ .s ⁻¹]	objemová rychlost
r	[m]	poloměr membrány
S	[m ²]	plocha
S₀	[m ²]	plocha rezonátoru
S₁	[m ²]	plocha průřezu dutiny
t	[°C]	teplota
T	[s ⁻¹]	perioda
u	[m.s ⁻¹]	akustická rychlost
V	[m ³]	objem dutiny
W	[W]	akustický výkon
Z_a	[Pa.s.m ⁻³]	akustická impedance (odpor)

Y_a	$[\text{Pa.s.m}^{-3}]$	akustická admitance
α	$[-]$	činitel zvukové pohltivosti
β	$[-]$	činitel zvukové odrazivosti
κ	$[-]$	Poissonova konstanta
λ	$[\text{m}]$	vlnová délka
ν	$[\text{N.m}^{-1}]$	radiální napínací síla
π	$[-]$	Ludolfovo číslo
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota
τ	$[-]$	součinitel průzvučnosti
ω	$[\text{rad.s}^{-1}]$	úhlová rychlost kmitů
ω_0	$[\text{rad.s}^{-1}]$	frekvence vlastních kmitů
ω_r	$[\text{rad.s}^{-1}]$	rezonanční frekvence

1 ÚVOD

Zvuk je přirozeným průvodním jevem přírodních dějů i životní aktivity člověka, je součástí životního prostředí. Moderní doba přinesla do tohoto prostředí velké množství nových zdrojů zvuku. Organismus člověka nemá fyziologickou možnost vědomé regulace intenzity přijímaného zvukového signálu, proto působí tyto zvuky v plné síle, ruší člověka při práci a odpočinku, ztěžují komunikaci řeči, ruší vnímání důležitých zvukových signálů a při vyšších intenzitách a nebo při dlouhodobém působení dokonce mohou být příčinou trvalého poškození sluchového orgánu. Příliš časté nebo příliš silné a v nevhodnou dobu se vyskytující zvuky, které jsou nežádoucí, rušivé, obtěžující nebo lidskému zdraví škodlivé, se označují jako hluk. Protože nadměrný zvuk (tedy hluk) má na život člověka mnohostranné vesměs negativní účinky, je potřeba omezování takového zvuku nesporná.

Existuje několik metod, jak minimalizovat účinky nadměrného zvuku, ať už jde o odstranění zdroje zvuku nebo snižování hlučnosti (např. tlumení vibrací strojů), umístění hlučných zařízení do chráněných prostorů, zvukové odizolování, využití zvukové pohltivosti některých materiálů a také používání osobních ochranných pomůcek [3, 9].

Objev a realizace průmyslového způsobu výroby nanovláknenných vrstev přináší otázku, ve kterých oblastech je vhodné a výhodné nanovláknenné vrstvy používat. Významné vlastnosti předurčují nanovláknna pro velký rozsah aplikací od filtrů, separačních membrán přes tkáňové inženýrství po zvukově pohltivé materiály atd. [10].

Tato práce je zaměřena na určování rezonančních charakteristik nanovláknenného materiálu pro využití v oblasti zvukově pohltivých konstrukcí.

Teoretická část je věnována základním poznatkům o zvuku jako fyzikálním jevu. Dále se zabývá problémem zvukové pohltivosti se zaměřením na různé typy zvukově pohltivých konstrukcí a metodami určení činitele zvukové pohltivosti. Následuje popis vyvíjené optické metody ke stanovení rezonanční frekvence materiálu.

V experimentální části je popsán postup zjištění rezonančních frekvencí vzorků nanovláknenných vrstev vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu o různých plošných hmotnostech (16,6; 8,3; 4,2; 2,8; 2,1 g.m⁻²).

Nanovrstvy jsou nanесeny na papírovém mezikruží a umístěny v měřicí trubici. Ze zdroje zvuku vychází rovinná sinusová zvuková vlna různých frekvencí. Membrána po dopadu zvukového vlnění začne kmitat a pro určitou frekvenci se dostane do stavu rezonance (amplituda výchylky je největší). Rezonanční soustava účelně pohlcuje zvuk tehdy, je-li dostatečně tlumena. Zvuková energie nashromážděná v rezonátoru je pak přeměněna v energii tepelnou [9].

Výchylky kmitů membrány jsou snímány digitální rychlokamerou. Obrazový záznam pohybu kmitající membrány je zpracován a následně je vyhodnocen vliv plošné hmotnosti nanovrstvy na hodnotu rezonanční frekvence.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Úvod do teorie zvuku

Zvuk je každé podélné (v pevných látkách případně také příčné) mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Každý zvuk se vyznačuje svojí fyzikální intenzitou, se kterou je rovnocenná veličina nazývaná hladina intenzity zvuku měřená v dB, a fyziologickou hladinou své hlasitosti. Mimo to se zvuky vyznačují ještě frekvencí, která určuje jejich výšku. Třetí základní vlastností zvuku je průběh kmitání, ovlivňující jeho zabarvení. Trvání zvuku v čase určuje jeho délku [17].

Oblast slyšení člověka je omezena pásmem slyšitelných frekvencí přibližně od 16 do 16 000 Hz a rozsahem intenzity zvuku mezi prahem slyšení (cca 10^{-12} W.m⁻²) a prahem bolesti (cca 10 W.m⁻²). Jedná se o intenzity velmi malé, takže zvukové vlny se šíří prostředím bez jakékoli viditelné odezvy nebo účinku a jedinými systémy, které jsou dostatečně citlivé k tomu, aby toto vlnění zaznamenaly, jsou sluchové orgány živých organismů a nebo velmi citlivá měřící zařízení.

V širším smyslu lze za zvuk označovat i vlnění s frekvencemi mimo tento rozsah. Zvuk s frekvencí nižší než 16 Hz nazýváme infrazvuk, zvuk s frekvencí vyšší než 16 kHz nazýváme ultrazvuk.

Zvuk se šíří v plynném, kapalném prostředí i v pevných látkách. Zvukové vlny jsou prostředím, ve kterém se šíří, v různé míře pohlcovány, odraženy, rozptylovány, soustřeďovány či tlumeny. Vhodným uspořádáním prostorů a konstrukcí tak lze ovlivňovat šíření akustické energie a dosahovat jejího omezení [3].

Zdroj zvukového vlnění se stručně nazývá zdroj zvuku a hmotné prostředí, ve kterém se toto vlnění šíří, jeho vodič. Vodič zvuku, obvykle vzduch, zprostředkuje spojení mezi zdrojem zvuku a jeho přijímačem (detektorem), kterým bývá v praxi ucho, mikrofon nebo snímač. Zdrojem zvuku mohou být kromě těles, kmitajících vlastními kmity, i tělesa kmitající kmito vynucenými. K nim patří i reproduktory, sluchátka a další zařízení pro generování nebo reprodukci zvuku [17].

Jako **hluk** bývá označován nepříjemný, rušivý zvuk. Tato definice je subjektivní, protože tentýž zvuk může být pro někoho obtěžující a pro jiného přijatelný nebo dokonce příjemný. Hluk jsou zvuky vyvolané neperiodickými kmity (většinou jsou lidskému uchu nepříjemné). Pro měření intenzity hluku se používá nejčastěji jednotka decibel (dB) [14]. Z biologického hlediska je známo, že hluk způsobuje vypětí nervové soustavy, snižuje schopnost soustředit se na práci, vyvolává únavu, podrážděnost, nespavost a při dlouhodobější expozici způsobuje ztráty sluchu [3].

Akustika je obor zabývající se fyzikálními ději a biologickými procesy, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem. [6]. Akustikou se původně rozuměla nauka o slyšitelném zvuku a v tomto užším smyslu se toho slova dosud často užívá. Pozornost se však věnuje i mechanickým kmitům a vlnám mimo obor slyšitelných frekvencí [1].

Tento obor lze rozdělit na několik částí:

Fyzikální akustika - studuje způsob vzniku a šíření zvuku. Dále se zabývá jeho odrazem a pohlcováním v různých materiálech.

Hudební akustika - zkoumá zvuky a jejich kombinace se zřetelem na potřeby hudby a zpěvu.

Fyziologická akustika - se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu. Lékařská hygiena se také podrobně zabývá vlivem hluku na lidské zdraví a fungování lidského organismu.

Stavební akustika - zkoumá dobré a nerušené podmínky poslouchatelnosti hudby a řeči v obytných místnostech a sálech, ale také možnosti eliminace nežádoucího šíření hluku mimo místnosti.

Elektroakustika - se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu [13].

2.1.1. Základní pojmy akustiky

Perioda T [s] je nejkratší doba, za kterou se děj opakuje.

Kmitočet (frekvence) zvuku f [Hz] vyjadřuje počet změn za jednotku času [11].

Je definován následujícím vztahem

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Rychlost zvuku c [m.s^{-1}] je rychlost šíření zvukové vlny. Rychlost zvuku v plynech roste s jejich teplotou. K šíření zvuku je potřeba nějakého látkového prostředí. Proto se zvuk nešíří ve vakuu, které neobsahuje žádné částice.

Pro rychlost zvuku ve vzduchu platí následující vztah:

$$c = (331,8 + 0,6t), \quad (2)$$

kde t je teplota [$^{\circ}\text{C}$]. Při teplotě vzduchu 20°C je rychlost šíření zvuku $c = 344 \text{ m.s}^{-1}$ [7].

Vlnová délka λ [m] označuje nejmenší vzdálenost dvou bodů, které kmitají se stejnou fází; nebo vzdálenost, kterou vlnění urazí za jednu periodu. Je dána vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad (3)$$

kde c [m.s^{-1}] je rychlost šíření zvuku a f [Hz] je frekvence [9, 11].

Akustický výkon P [W] je výkon vyzařovaný, přenášený nebo přijímaný prostřednictvím zvukového vlnění. Projde-li danou plochou za dobu t zvuková energie E , pak okamžitý akustický výkon prochází touto plochou

$$P = \frac{dE}{dt}. \quad (4)$$

Intenzita zvuku I [W.m^{-2}] charakterizuje jednosměrný přenos akustického výkonu P procházejícího plochou S [12]. Je definována vztahem

$$I = \frac{dP}{dS}. \quad (5)$$

Hladina intenzity zvuku L [dB] je definována vztahem

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (6)$$

kde I_0 je práh slyšení ($I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ při frekvenci 1 kHz) a I je práh bolesti $I = 10 \text{ W.m}^{-2}$ [11].

Akustická rychlost u [m.s^{-1}] je proměnná rychlost uspořádaného kmitavého pohybu částic prostředí, který konají, šíří-li se prostředím zvukové vlnění.

Akustický tlak p_a [Pa] je rozdíl mezi okamžitým celkovým tlakem prostředí a jeho statickým tlakem při šíření zvukového vlnění tímto prostředím.

Objemová rychlost q je okamžitý objemový tok látky prostředí danou plochou vyvolaný zvukovou vlnou šířící se v tomto prostředí.

Akustická impedance Z_a [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$] je rovna podílu akustického tlaku p_a a objemové rychlosti q určené pro tuto plochu:

$$Z_a = \frac{p_a}{q}. \quad (7)$$

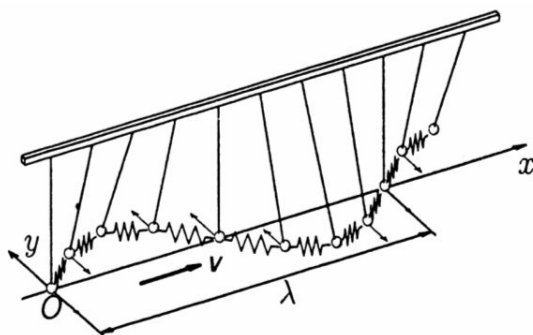
Akustická admittance Y_a [$\text{m}^3\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] je převrácená hodnota akustické impedance a vyjadřuje snadnost, se kterou zvukové vlny pronikají prostředím [7].

2.2. Zvuk jako mechanické vlnění

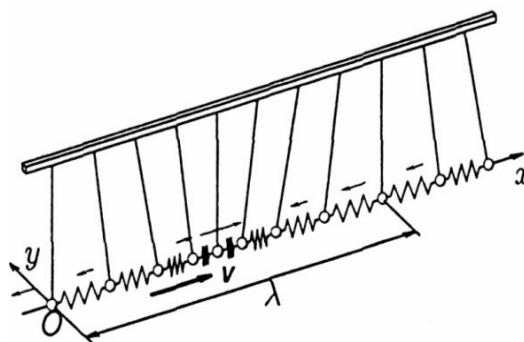
Mechanické vlnění je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Příčinou vzniku mechanického vlnění jsou vazebné síly, kterými na sebe navzájem působí částice látkového prostředí (pevné látky, kapaliny, reálné plyny). Kmitání jedné částice se vazbou přenáší postupně na další částice.

Obrázek 1 znázorňuje vznik vlnění v řadě hmotných bodů, mezi kterými existuje vazba. Počáteční bod (zdroj vlnění) kmitá ve směru osy y a vlnění postupuje ve směru osy x . Body kmitají kolmo ke směru, kterým se vlnění šíří a vzniká postupné vlnění příčné. Tento druh vlnění vzniká v tělesech, která jsou pružná při změně tvaru.

Jestliže počáteční bod kmitá ve směru, kterým se vlnění šíří (obr. 2), vzniká postupné vlnění podélné. Je charakteristické zhušťováním a zředňováním kmitajících bodů kolem míst, v nichž je okamžitá výchylka bodu nulová. Zhuštění, popř. zředění postupuje rychlostí vlnění ve směru, kterým se vlnění šíří. Vzniká v prostředí pružném při změně objemu. Tímto vlněním se šíří zvuk [11].



Obr. 1: Postupné vlnění příčné.
Čerpáno z [11].



Obr. 2: Postupné vlnění podélné.
Čerpáno z [11].

Jestliže vlnění prochází rozhraním mezi dvěma prostředím, v nichž jsou rychlosti vlnění různé, nastává lom vlnění. Vlnění se po průchodu šíří jiným směrem [11]. Pokud rovinná vlna dopadne na dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné, odrazí se zpět do původního prostředí [15].

Pokud se prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. Avšak v místech, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání. Nastává interference vlnění a kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění [11]. Podle principu superpozice vln se každá z interferujících vln šíří prostředím nezávisle na ostatních vlnách stejné fyzikální povahy, které se jím šíří současně, tj. každá z těchto vln se šíří stejně jako při absenci ostatních vln [7].

2.3. Rezonance

Rezonance označuje jev, který lze pozorovat při nuceném kmitání, kdy vhodně působící malá budící síla může způsobit velké změny v kmitajícím systému.

Rezonance lze pozorovat v případě nucených kmitů, je-li frekvence vnější budící síly shodná s vlastními kmity oscilátoru.

Amplituda nucených kmitů nabývá maximální hodnotu pro frekvenci budící síly

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (8)$$

kde ω_0 je frekvence vlastních kmitů oscilátoru a δ je součinitel útlumu (tlumení) kmitající soustavy. Při frekvenci ω_r budící síly se hovoří o rezonanci vlastních a nucených kmitů soustavy. Frekvence ω_r se nazývá rezonanční frekvence.

Dosazením rezonanční frekvence do výrazu pro amplitudu nucených kmitů, dostaneme pro rezonanční amplitudu vztah

$$A_r = \frac{\frac{A_a}{m}}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \frac{A_a}{2m\delta\omega} \omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (9)$$

kde ω je úhlová frekvence tlumených kmitů, m je hmotnost kmitajícího tělesa a A_a je amplituda budící síly.

Fázový rozdíl mezi nucenými kmity a budící silou lze při rezonanci vyjádřit vztahem

$$\operatorname{tg} \gamma = -\sqrt{\frac{\omega_0^2 - 2\delta^2}{\delta}} \quad \omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}. \quad (9)$$

Závislost amplitudy nucených kmitů na úhlové frekvenci ω se zobrazuje rezonančními křivkami, nejčastěji amplitudovou rezonanční křivkou a frekvenční rezonanční křivkou.

Rezonance se výrazněji vyskytuje pouze při slabém tlumení, kdy je však možné součinitel útlumu zanedbat proti vlastní kruhové frekvenci, tzn. $\delta \ll \omega_0$. To nám umožňuje zanedbat ve vztahu pro rezonanční frekvenci δ proti ω_0 , je tedy možné položit

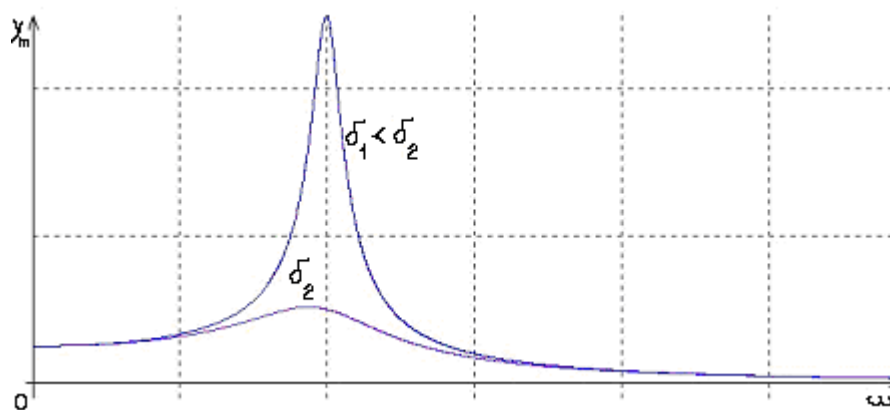
$\omega_r \approx \omega_0$. Pro rezonanční amplitudu nucených kmitů pak dostáváme $A_r \approx \frac{A_a}{2m\delta\omega_0}$. Při

slabém tlumení tedy rezonanční amplituda nucených kmitů a energie kmitů dosahují maxima téměř současně. Fázový posun mezi nucenými kmity a budící silou můžeme v takovém případě položit s dostatečnou přesností roven $-\frac{\pi}{2}$.

Celková mechanická energie nucených kmitů nemá své maximum při rezonanční frekvenci ω_r . K rezonanci mechanické energie dochází při $\omega_r = \omega_0$. Rezonance mechanické energie nezávisí na tlumení [16].

2.3.1. Rezonance mechanického oscilátoru

Rezonance je jev, který vzniká při vzájemném působení dvou oscilátorů. Jeden je zdrojem nuceného kmitání (oscilátor) a druhý se působením zdroje nuceně rozkmitá (rezonátor). Vzájemné působení mezi oscilátorem a rezonátorem podmiňuje vazba, kterou je zprostředkován přenos energie. Jestliže je působení oscilátoru na rezonátor slabé (vazba volná), přechází energie do rezonátoru zvolna a amplituda nucených kmitů je malá. Při silném vzájemném působení (vazba těsná) je přechod energie rychlejší a amplituda výchylky větší [16].



Obr. 3: Rezonanční křivka. Čerpáno z [11].

Pokud budeme postupně zvyšovat frekvenci ω nuceného kmitání mechanického oscilátoru od určité minimální hodnoty, bude se amplituda výchylky zvětšovat a maxima dosáhne v okamžiku, kdy $\omega = \omega_0$. Jakmile se frekvence nuceného kmitání rovná frekvenci vlastního kmitání oscilátoru, nastává rezonance oscilátoru. Při dalším zvyšování frekvence se amplituda nucených kmitů opět zmenšuje. U oscilátoru s koeficientem tlumení δ nastává rezonance při nižší frekvenci ω , pro kterou platí rovnice (8).

Z průběhu rezonanční křivky (obr. 3) můžeme usuzovat na vlastnosti oscilátoru, zejména na jeho tlumení. Čím menší je tlumení, tím je maximum rezonanční křivky vyšší (y_m dosahuje vyšší hodnoty) a křivka je užší [11].

2.4. Mechanismus pohlcování zvuku

Pod pojmem pohlcování zvuku máme z fyzikálního hlediska na mysli přeměnu zvukové energie v energii jinou, obvykle tepelnou. Způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách můžeme rozdělit na tři druhy:

- přeměny vznikající třením
- přeměny vznikající poklesem akustického tlaku
- přeměny vznikající nepružnou deformací těles

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází tehdy, pohybuje-li se vzduch v blízkosti pevné stěny. Aby bylo přeměněno dostatečné množství energie, musí plocha, na níž nastává tření, být dostatečně velká. Proto se k pohlcování zvuku tímto způsobem hodí látky porézní, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně velká.

Při šíření zvukové vlny látkou nastává v určitých místech zhuštění částic a současně stoupá celkový tlak. Jestliže dojde z jakýchkoliv důvodů ke snížení neboli relaxaci tlaku, sníží se i potenciální energie nashromážděná v uvažovaném místě a tím se zmenší i energie zvukové vlny. Příčin relaxace akustického tlaku může být několik. Při stlačení vzduchu dojde k vzrůstu teploty, a jelikož soustava pórů není od kostry tepelně izolována, dojde k přestupu tepla ze vzduchu a tím i tlaku do kostry. Přechod tepla má za následek snížení teploty vzduchu a tím i tlaku v uvažovaném místě.

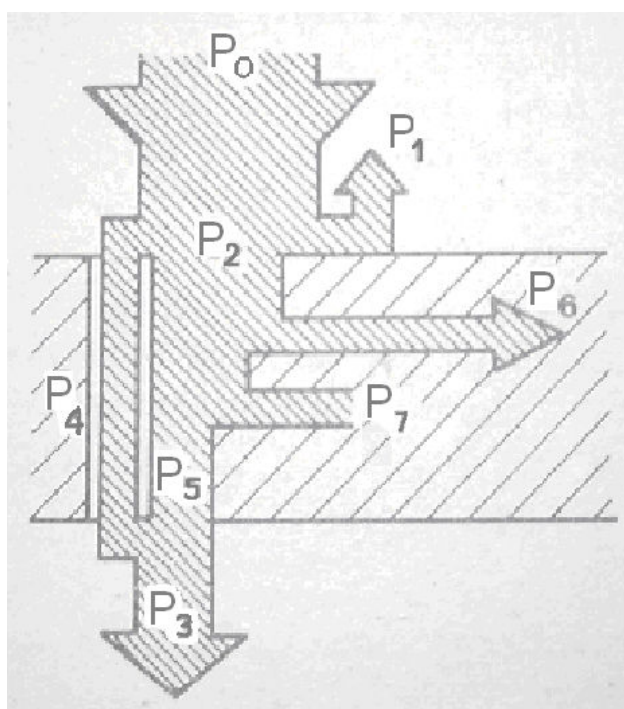
K přeměně zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu, přestane-li síla působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti [9].

2.4.1. Činitel zvukové pohltivosti

Co se děje s akustickou energií při dopadu na nějakou překážku nejlépe ukazuje schéma na obr. 4 [9].

Akustický výkon, dopadající na 1 m^2 stěny označený P_0 se rozdělí na akustický výkon:

- odražený P_1
- pohlcený P_2
- vyzářený za stěnu P_3
- prošlý za stěnu otvory a póry P_4
- vyzářený stěnou v důsledku kmitání stěny P_5
- vedený ve formě chvění do ostatních částí konstrukce P_6
- přeměněný na teplo P_7



Obr. 4: Schéma rozdělení akustického výkonu při dopadu na stěnu [9].

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti α , který je definován jako poměr energie I_2 , pohlcené určitou plochou k energii I_0 na tuto plochu dopadající, tj. výrazem

$$\alpha = \frac{P_2}{P_0}. \quad (10)$$

Z tohoto výrazu je patrné, že činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně, má činitel pohltivosti roven jedné, zatímco stěna, dokonale zvuk odrážející má tento činitel roven nule.

Podobným způsobem lze definovat činitele zvukové odrazivosti β

$$\beta = \frac{P_1}{P_0}, \quad (11)$$

a činitele průzvučnosti

$$\tau = \frac{P_3}{P_0} = \frac{P_4 + P_5}{P_0}. \quad (12)$$

Uvedené rozdělení akustické energie vyhovuje oblasti prostorové akustiky [9].

2.5. Konstrukce na pohlcování zvuku

Účelové pohlcovače jsou konstrukce, kterými se formou obkladu zvyšuje činitel zvukové pohltivosti stropu nebo stěn místnosti v důsledku zvýšení její celkové zvukové pohltivosti. Podle konstrukčního uspořádání a principu jejich funkce lze pohltivé konstrukce dělit na:

- porézní pohlcovače
- pohlcovače založené na rezonančním principu (kmitající membrány a desky, dutinové rezonátory)
- kombinované pohlcovače [3, 9].

2.5.1. Pohltivé konstrukce z pórovitých materiálů

Jedná se o pevnou látku, v jejímž objemu se nacházejí malé dutinky vyplněné vzduchem. Materiál, tvořící kostru látky je vláknitý nebo se strukturou ztuhlé pěny. Póry musí být navzájem propojené a otevřené do volného prostoru. Látky, mající elastickou kostru mohou mít i póry uzavřené. Jejich celková pohltivost je obvykle nižší.

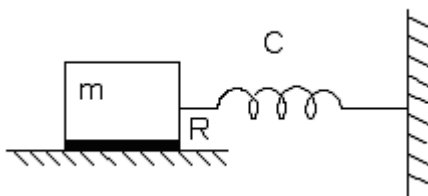
Účinnost porézních pohlcovačů závisí na jejich umístění a je obvykle různá pro různé frekvence zvuku. Nejvíce jsou účinné, jsou-li přítomny ve vzdálenosti od tvrdého povrchu rovné lichému násobku čtvrtiny vlnové délky pohlcovaného zvuku. Pohlcují proto převážně vysoké frekvence, jejichž vlnová délka je krátká. Pohltivé vlastnosti porézního obkladu je možné regulovat jeho tloušťkou h [m] a případně odsazením d [m] od obkládaného povrchu [3, 9].

2.5.2. Pohltivé konstrukce založené na rezonančním principu

Tato uspořádání můžeme rozdělit do dvou skupin:

- uspořádání chovající se jako kmitající membrány a desky
- uspořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů

Na obrázku 5 je schematicky znázorněna rezonanční soustava. Pro ni je charakteristické, že se skládá vždy z určité hmoty m upevněné na nějaké poddajnosti C . Pohyb hmoty je ovlivňován ještě třením, které je v našem případě reprezentováno odporem R . Pro určitou frekvenci se hmota spolu s poddajností dostane do stavu rezonance, což znamená, že amplituda výchylky je největší [9].



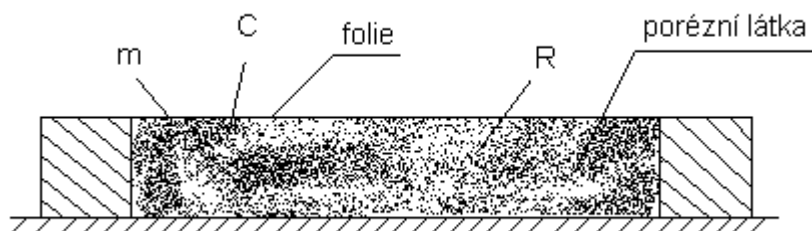
Obr. 5: Schematické znázornění uspořádání kmitající akustické soustavy [9].

Uvažujme o rezonanční soustavě na určité rezonanční frekvenci. Dopadne-li na ni zvukové vlnění, uvede ji do vynuceného kmitání, při čemž amplituda kmitů bude maximální v rezonanci. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude ještě po jistou dobu dokmitávat na vlastní (rezonanční) frekvenci. Tomuto jevu říkáme doznívání a může nastat nejen u rezonančních soustav určených pro pohlcování zvuku, ale i u zdrojů zvuku (např. struny klavíru) a případně u jiných předmětů nacházejících se v uzavřeném prostoru. Doba, po kterou takový rezonátor doznívá, se nazývá doba doznívání, a je závislá na tlumení rezonátoru. Při malém tlumení může vlivem doznívání být doba dozvuku na rezonanční frekvenci prodlužována, umístíme-li do uzavřeného prostoru určitý počet nedostatečně tlumených rezonátorů. To ovšem neznamená, že by se rezonátor stával zdrojem nové energie. Pouze energie jiných frekvencí je přeměněna na energii frekvence jiné. Pokud se týká celkového množství energie, vždy dochází působením rezonátoru k útlumu, neboť každý rezonátor přeměňuje jistou část zvukové energie v jinou. Má-li však rezonanční soustava sloužit k účelnému pohlcování zvuku, musí být tlumena dostatečně, aby co největší množství zvukové energie nashromážděné v rezonátoru bylo přeměněno v teplo.

Závislost činitele pohltivosti na frekvenci vykazuje u rezonančních soustav vždy maximum na vlastní frekvenci soustavy, neboť množství zvukové energie přeměněné na energii jinou stoupá s velikostí amplitudy některé z akustických veličin (většinou akustické rychlosti) a ty mají v rezonanci své maximum [9].

2.5.2.1. Kmitající membrány

Pod pojmem kmitající membrána rozumíme tenkou desku nebo folii, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná a která je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny, jak je znázorněno na obrázku 6. Chování takové membrány můžeme v prvním přiblížení přirovnat k chování určité hmoty m (reprezentované membránou) pružně zachycené na pružině (reprezentované vzduchovým polštářem). Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celou soustavu [9].



Obr. 6: Schematické znázornění kmitající membrány. Čerpáno z [9].

Obvykle se volí membrána z takové látky, aby její ohybová tuhost ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře byla mnohem menší. Proto se vliv upevnění membrány na okraji prakticky neprojevuje a membrána se bude projevovat jako celek podobně jako kmitající píst. Rezonanční frekvenci soustavy stanovíme ze vztahu

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}}, \quad (13)$$

kde c [ms^{-1}] je rychlost šíření zvuku, ρ [kg.m^{-3}] měrná hmotnost, S [m^2] plocha membrány, m [kg.m^{-2}] hmota membrány, d [m] tloušťka vzduchového polštáře [9].

V práci [12] je popisována tenká homogenní elastická fólie s konstantní plošnou hmotností, která je napnutá na tuhý kruhový rám. Tímto napnutím vyvolaným radiálně působící silou membrána získává svoji tuhost. Radiálně působící napínací síla vztažená na jednotku délky obvodu rámu v [N.m^{-1}] je ve všech směrech konstantní a je rovna vztahu

$$v = \frac{F_r}{2\pi.r}, \quad (14)$$

kde F_r [N] je celková napínací síla, r [m] udává poloměr membrány (neboli poloměr tuhé kruhové podpory, přes níž je membrána napjata).

Rychlost příčné vlny šířící se na membráně c_M [m.s⁻¹] je dána vztahem

$$c_M = \sqrt{\frac{v}{m_1}}, \quad (15)$$

kde v [N.m⁻¹] je radiální napínací síla, m_1 [kg.m⁻²] označuje plošnou hmotnost homogenní elastické membrány.

Pro vlnové číslo k_M [m⁻¹] platí

$$k_M = \frac{\omega}{c_M}, \quad (16)$$

kde ω [s⁻¹] je úhlová rychlost kmitů, c_M [m.s⁻¹] představuje rychlost příčné vlny šířící se na membráně.

Pokud je splněn předpoklad osově symetrických kmitů, pak platí následující vztah, ze kterého lze s pomocí koeficientů a_i z tab.1 stanovit vlastní frekvence membrány.

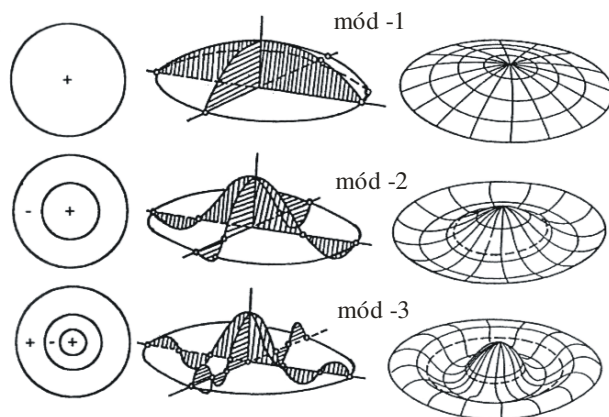
$$\omega_i = \frac{a_i c_M}{r}, \quad (17)$$

kde c_M [m.s⁻¹] je rychlost příčné vlny šířící se na membráně, r [m] udává poloměr membrány, ω [s⁻¹] je úhlová rychlost kmitů.

Tab. 1: Hodnoty a_i symetrických volných kmitů tenké kruhové membrány [12].

i	1	2	3	4
a_i	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915

Na obrázku 7 je znázorněno rozložení výchylek prvních tří symetrických módů kmitání kruhové membrány. Jsou zde v řezech naznačeny průhybové čáry při jednotlivých módech, nakresleny uzlové čáry, označeny polarity výchylek a znázorněny tvary ploch [12].



Obr. 7: Výchylky prvních tří symetrických módů kruhové membrány. Čerpáno z [12].

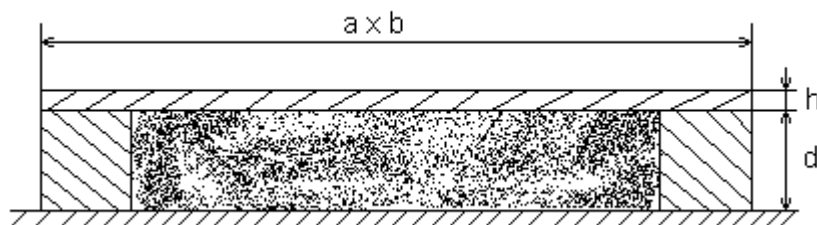
2.5.2.2. Kmitající desky

Kmitající desky (obr. 8) se od membrán liší především svou tuhostí v ohybu, která obvykle tuhost vzduchového polštáře značně převyšuje. Ve srovnání s membránami se u desek (kromě základních kmitů) uplatňují i kmity vyších řádů. Vlastní frekvence obdélníkové desky o rozměrech a a b , tloušťce h , ploše S a modulu pružnosti E , která je upevněna na okraji (nikoliv vetknuta), je dán výrazem

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{md} + \frac{\pi 4S}{m} \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}}, \quad (18)$$

$p, q = 1, 2, \dots$

kde d [m] je vzdálenost desky od pevné stěny, μ je Poissonova konstanta, p a q udávají řád příslušných vlastních kmitů [9].

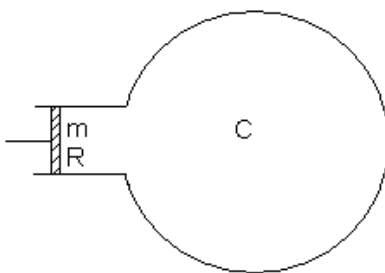


Obr. 8: Schematické znázornění kmitající desky. Čerpáno z [9].

Potřebného tlumení kmitajících desek se obvykle dosáhne vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodnými porézními materiály [9].

2.5.2.3. Rezonátory Helmholtzova typu

Helmholtzův rezonátor znázorněný schematicky na obr. 9 je tvořen dutinou o určitém objemu V , opatřenou hrdlem, v níž se nachází určitá hmota, kterou můžeme reprezentovat pístem. Vlastností objemu je poddajnost C , píst nám reprezentuje akustickou hmotu m . Pohybu pístu a i akustické hmotě je kladen určitý odpor tření, který má velikost R [9].



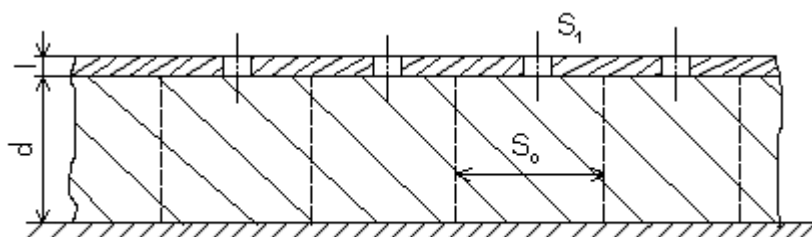
Obr. 9: Helmholtzův rezonátor. Čerpáno z [9].

Rezonanční frekvence takového rezonátoru je dána výrazem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}}, \quad (19)$$

kde S [m^2] je plocha membrány, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] označuje hustotu vzduchu, m [kg] je hmotnost membrány a d [m] tloušťka vzduchového polštáře [5].

Jednotlivě rozmístěné rezonátory se v praxi používají velmi zřídka a to pro pohlcování nejnižších zvukových frekvencí v případech, kdy z nějakého důvodu nelze použít kmitající membrány nebo desky [9].



Obr. 10: Konstrukce perforovaného panelu Čerpáno z [9].

Často jsou však používány tak zvané děrované panely, které jsou tvořeny tuhou deskou umístěnou v určité vzdálenosti od stěny a opatřenou kruhovými nebo kuželovými otvory, případně drážkami (obr. 10). Deska je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny, takže ke každému otvoru přísluší určitá dutina, jak je na obrázku znázorněno, která tvoří s otvorem Helmholtzův rezonátor. Přitom dutina reprezentuje akustickou poddajnost a otvor akustickou hmotu. Rezonanční frekvence takovéto soustavy je dána vztahem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{hd}}, \quad (20)$$

kde ε je poměr plochy otvoru S_1 k ploše S_0 , připadající na jeden rezonátor, h [m] tloušťka desky, d [m] tloušťka vzduchového polštáře.

Závislost činitele pohltivosti na frekvenci má maximum na rezonanční frekvenci soustavy [9].

2.6. Teorie výroby netkaných textilií

2.6.1. Technologie výroby netkaných textilií

Netkaná textilie je vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, zpevněná mechanicky, chemicky nebo termicky. Technologie výroby je volena v závislosti na zpracovávané surovině, na požadovaných výsledných vlastnostech a oblasti použití textilie.

Textilie je možné upravovat (zušlechťováním, barvením, potiskem, atd.), povrstvovat a vzájemně vrstvit. Vrstvené textilie jsou složeny alespoň z jedné vlákenné

vrstvy s jiným typem plošné textilie (pletenina, tkanina) či netextilním útvarem (fólie z kovů, plastických hmot apod.).

Netkané textilie jsou používány v mnoha oblastech, nejčastěji jako technické textilie (filtry, geotextilie, agrotexilie, atd.), s úspěchem jsou používány v konstrukcích pro pohlcení zvuku [2].

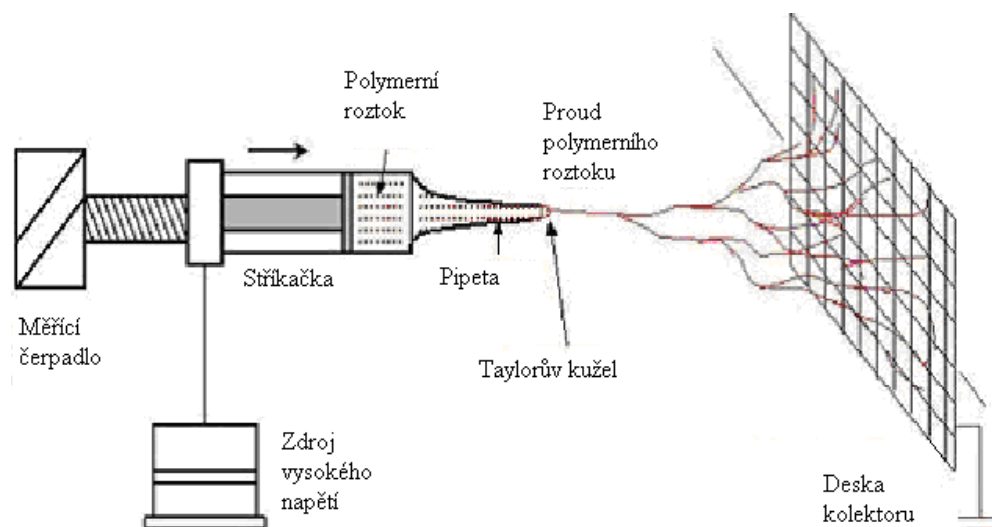
2.6.2. Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování je způsob přípravy ultra jemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny s pomocí elektrostatických sil. Touto metodou byly již zvlákňovány různé druhy polymerů přírodních a syntetických.

Nanovlákná jsou vlákna, jejichž průměr se pohybuje v submikronové oblasti, tedy v rozsahu do 1000 nm. Vyznačují se výjimečnými vlastnostmi jako je velký měrný povrch, velká pórovitost vlákněné vrstvy a malý rozměr pórů. Tyto vlastnosti je činí výbornými kandidáty pro širokou škálu aplikací jako vysoce účinné filtry, separační membrány, výztuhy pro kompozitní materiály, biologické aplikace, tkáňové inženýrství, zvukově absorpční aplikace apod. [10].

2.6.2.1. Princip elektrostatického zvlákňování

V procesu elektrostatického zvlákňování je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Elektroda vysokého napětí je přímo spojena s polymerním roztokem. Roztok je následně zvlákňován kapilárou (zvlákňovací tryskou). Díky elektrickému napětí mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel na špičce kapiláry, který je následkem relaxace indukovaného náboje k volnému povrchu kapaliny na výstupu ze zvlákňovací trysky. Zvýšením elektrického pole je dosaženo kritické hodnoty, při které odpudivá elektrostatická síla překoná povrchové napětí a ze špičky Taylorova kuželu je vypuzen nabitý proud kapaliny. Vlákná ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru [10].



Obr. 11: Schéma elektrostatického zvlákňování. Čerpáno z [18].

Pro elektrostatické zvlákňování je využíváno mnoha typů výrobních zařízení. V některých je kapilára umístěna svisle s kolektorem v pozici pod ní, polymer působením gravitace odkapává, formuje se do vláken ukládaných na kolektor. Někdy je kapilára nakloněna v definovaném úhlu pro kontrolu toku. V dalších případech je umístěna horizontálně a pro uvedení kapky do procesu je užito čerpadlo, které může být použito také u vertikálního podávání (obr. 11). Kolektorem je obvykle rovná deska nebo mřížka, která může být pokryta textilií. Vlákná jsou ukládána náhodně, existují však různá zařízení pro ukládání vláken jedním směrem (válcový kolektor s vysokou úhlovou rychlostí, pomocné elektrické pole, disk se zúženým okrajem, rámový kolektor, atp.).

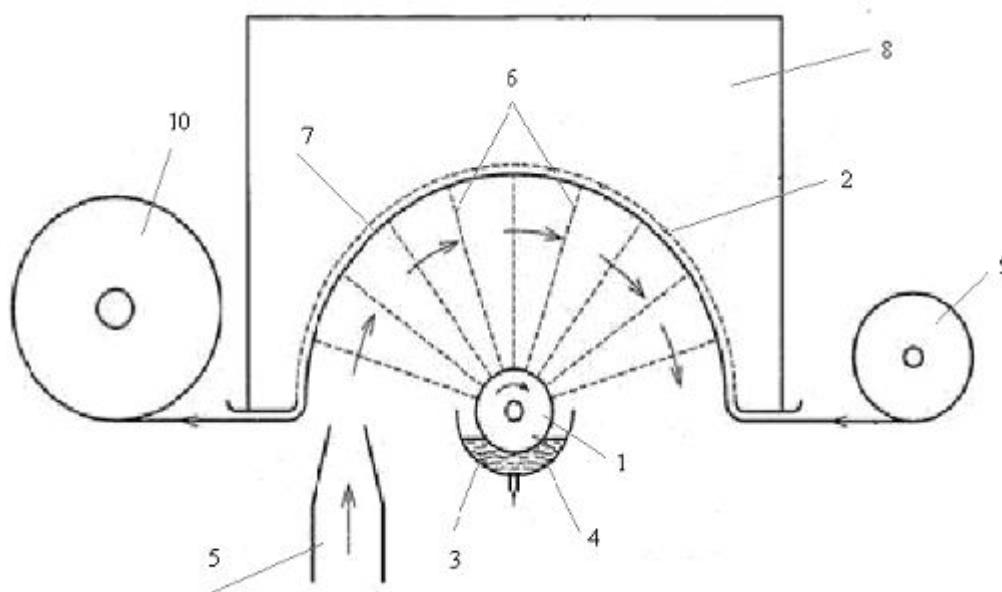
Elektrostatické zvlákňování provedené ve vakuu má oproti zvlákňování za přítomnosti vzduchu mnoho výhod. Ve vakuu může být použita vyšší elektrická intenzita pole na velké vzdálenosti a vyšší teplota [10].

2.6.2.2. Metoda „Nanospider“

Tento způsob přípravy nanovláken byl vyvinut na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci.

Nádoba válcového tvaru obsahuje polymerní roztok, uvnitř je umístěna válcová elektroda. Při otáčení je povrch elektrody pokryt polymerním roztokem a během

zvlákňování vzniká velké množství Taylorových kuželů. Nanovláknna jsou ukládána na kolektor a jejich vytváření je podpořeno odsáváním (viz obr. 12) [19].



Obr. 12: Schéma zařízení “Nanospider”

1 - rotující válcová elektroda spojená se zdrojem napětí, 2 - sběrná elektroda,
3 - zásobní nádoba, 4 - polymerní roztok, 5 - směr proudění vzduchu, 6 - nanovláknna,
7 - podkladová vrstva, 8 - vakuová komora, 9 - odvíjecí zařízení, 10 - navíjecí zařízení.

Čerpáno z [19].

2.6.3. Polyvinylalkohol

Vzorky, kterými se zabýváme v této práci, jsou vytvořeny z nanovláknenné vrstvy, která byla vyrobena elektrostatickým zvlákňováním polyvinylalkoholu.

Polyvinylalkohol (PVA) se průmyslově připravuje hydrolýzou polyvinylacetátu. Přímá syntéza z monomeru není možná, neboť vinylalkohol není stálá sloučenina a přechází ve stabilnější formu – acetaldehyd.

Lineární makromolekuly s polárními hydroxylovými skupinami jsou navzájem poutány vodíkovými můstky. Část hmoty je v krystalickém stavu. Podíl krystalické fáze se zvyšuje se stoupajícím stupněm hydrolýzy. Podle stupně hydrolýzy lze získat

produkty obsahující jen alkoholické skupiny nebo zachovat určitou část acetátových skupin. Vlastnosti polyvinylalkoholu jsou značně závislé na chemickém složení.

Síťováním polyvinylalkoholu lze snížit jeho rozpustnost ve vodě a zlepšit mechanické vlastnosti. Polyvinylalkohol je nejčastěji zesíťován formaldehydem nebo účinkem kyselin [6].

Teplota skelného přechodu (T_g) polyvinylalkoholu je 73 - 80 °C a teplota tání 230°C až 250°C [8].

2.7. Metody pro určování činitele zvukové pohltivosti a rezonanční frekvence

Činitel zvukové pohltivosti je možné zjistit několika způsoby. Níže uvedené informace se týkají několika nejrozšířenějších metod.

Určování činitele zvukové pohltivosti v impedanční trubici - metoda poměru stojaté vlny

Měřicí zařízení se skládá z impedanční trubice, držáku zkušebního vzorku, mikrofonní sondy, zařízení pro pohyb a umístění mikrofonní sondy, zařízení pro zpracování mikrofonního signálu, reproduktoru, generátoru signálu, uzávěru impedanční trubice a teploměru.

Zkušební vzorek se upevňuje do jednoho konce rovné, tuhé a hladké impedanční trubice. Dopadající rovinná sinusová vlna je buzena reproduktorem v opačném konci trubice. Superpozicí dopadající a odražené vlny od zkušebního vzorku vzniká v trubici stojatá vlna. Vyhodnocení vychází ze změřených hodnot amplitudy akustického tlaku v tlakových minimech a amplitudy v tlakových maximech. Tyto údaje postačují k určení činitele zvukové pohltivosti.

Tato metoda se v zásadě opírá o skutečnost, že ve zkušebním úseku trubice existují pouze rovinná vlna dopadající a vlny odražené, šířící se rovnoběžně s osou trubice. Dále se předpokládá, že zvuková vlna se v trubici šíří bez útlumu. Na zbývající útlum způsobený viskózními a teplotními ztrátami lze použít korekce.

Určení činitele zvukové pohltivosti spočívá ve změření amplitudy tlakového minima $|p_{min}|$ a amplitudy tlakového maxima $|p_{max}|$, a to na každém kmitočtu. Z těchto údajů se vypočítává

$$s = \frac{|p_{max}|}{|p_{min}|}. \quad (21)$$

A poté se nalezne absolutní hodnota r činitele odrazu s pomocí

$$s = \frac{1+|r|}{1-|r|}, \quad (22)$$

$$\Rightarrow |r| = \frac{s-1}{s+1}. \quad (23)$$

Nakonec se z následující rovnice získá činitel pohltivosti α [24].

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (24)$$

Určování činitele zvukové pohltivosti v impedanční trubici - metoda přenosové funkce

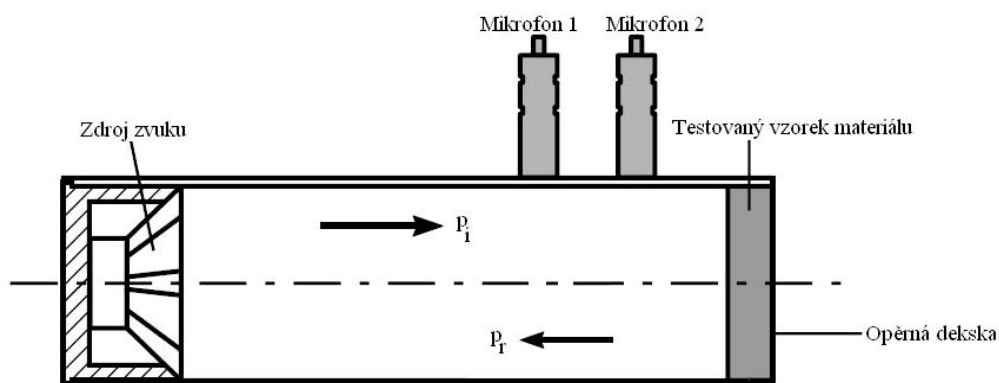
Impedanční trubice se používá pro měření akustických charakteristik malých testovacích vzorků. V této metodě je širokopásmový stacionární náhodný signál rozkládán do jeho dopadající a odražené složky (obr. 13) [4].

Přístroj je v podstatě trubice s držákem vzorku na jednom konci a zdrojem zvuku na druhém konci. Mikrofony se obvykle nacházejí na dvou nebo třech místech podél stěny trubice, jsou ale možné i varianty s mikrofonom upevněným uprostřed nebo s mikrofonní sondou.

Impedanční trubice musí být rovná o konstantním průřezu, s tuhými, hladkými neporézními stěnami bez děr nebo štěrbin (s výjimkou míst mikrofونů) ve zkušebním úseku. Stěny musí být těžké a dostatečně silné, aby nebyly rozkmitávány zvukovým signálem a nevykazovaly rezonance v pracovním kmitočtovém rozsahu trubice. Tvar průřezu trubice může být v podstatě libovolný. Doporučuje se průřez kruhový nebo pravoúhlý (čtvercový).

Trubice musí být dostatečně dlouhá, aby vyvolala vznik rovinné vlny mezi zdrojem a vzorkem. Místa měření se musí nacházet v poli rovinné vlny. Reprodukční

budí kromě rovinné vlny i vlny nerovinné. Ty vymizí do vzdálenosti asi tří průměrů kruhové trubice [25].



Obr. 13: Průřez Dvumikrofonové impedanční trubice (Brüel & Kjaer typ 4602), kde p_i je dopadající složka akustického tlaku a p_r odražená složka akustického tlaku.

Čerpáno z [4].

Signál vytvářený zvukovým zdrojem dopadá na vzorek materiálu. Mikrofony snímají složky dopadajícího P_i a odraženého P_r akustického tlaku, s pomocí nichž jsou vypočítávány tři frekvenční přenosové funkce: H_1 - frekvenční přenosová funkce, H_i - frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou, H_r - frekvenční přenosová funkce související s odraženou složkou. Z těchto hodnot lze určit celkový činitel zvukové odrazivosti R_0 vztahem:

$$R_0 = \left(\frac{H_1 - H_i}{H_r - H_1} \right) e^{j2k(1+s)}, \quad (25)$$

kde vlnové číslo $k = \frac{\omega}{c}$, l značí vzdálenost mezi prvním mikrofonem a zkoušeným vzorkem a s je vzdálenost mezi dvěma mikrofony. Výsledný činitel zvukové pohltivosti lze zjistit následovně

$$\alpha = 1 - |R_0|^2. \quad (26)$$

Dvumikrofonové měřicí zařízení je vybaveno dvěma trubicemi. Trubice s vnitřním průměrem 100 mm je určena pro měření na nižších frekvencích (50 Hz –

1,6 kHz) a trubice o vnitřním průměru 29 mm je určena pro vyšší frekvence (500 Hz – 6,4 kHz).

Výhodou metody je užití vzorků malých rozměrů, nevýhodou je měření pohltivosti pouze pro kolmý dopad zvuku [4].

Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti

Zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zdroje, se nazývá dozvuk. Dobou dozvuku nazýváme dobu, po které se sníží hladina akustického tlaku o 60 dB .

Průměrná doba dozvuku v dozvukové místnosti se zjišťuje měřením s namontovaným zkušebním vzorkem a bez vzorku. Z těchto dob dozvuku se s použitím Sabineovy rovnice (27) vypočítává ekvivalentní pohltivá plocha $A_T [m^3]$ zkušebního vzorku.

$$A_T = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V (m_2 - m_1), \quad (27)$$

kde $V [m^3]$ značí objem prázdné dozvukové místnosti, c_1 a $c_2 [m.s^{-1}]$ je rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě t_1 a t_2 , T_1 a $T_2 [s]$ je doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti a místnosti po vložení zkušebního vzorku, m_1 a $m_2 [m^{-1}]$ součinitel útlumu ve vzduchu. Činitel zvukové pohltivosti α je pak stanoven jako podíl

$$\alpha = \frac{A_T}{S}, \quad (28)$$

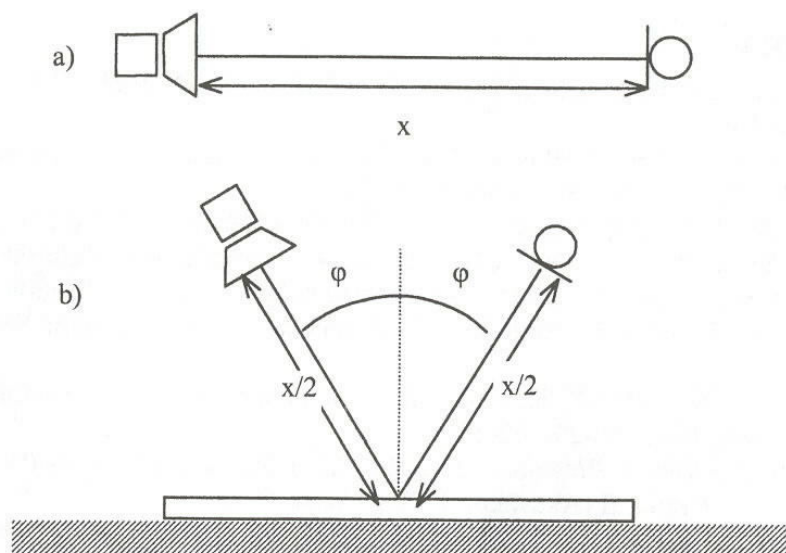
kde $S [m^2]$ je plocha pokrytá zkušebním vzorkem.

Objem dozvukové místnosti musí být alespoň $150 m^3$. Pokud je však objem místnosti větší než zhruba $500 m^3$, nelze měřit zvukovou pohltivost vysokých frekvencí přesně následkem pohltivosti ve vzduchu [26].

Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám. Nevýhodou je nezbytnost velké místnosti s nerovnoběžnými stěnami, které by měly být absolutně odrazivé s nulovou pohltivostí, a také použití vzorků velkých rozměrů [4].

Metoda odražené vlny

Metoda odražené zvukové vlny umožňuje určení činitele zvukové pohltivosti pro různé úhly dopadu zvukové energie φ . Krátký signál je nejdříve z reproduktoru vyslán přímo do mikrofону vzdáleného x a je změřena hladina akustického tlaku $L_{p,d}$ (obr. 14a). Poté jsou mikrofón a reproduktor nastaveny tak, aby směřovaly na zkušební vzorek pod stejným požadovaným úhlem, a délka dopadající a odražené složky zvuku byla shodná se vzdáleností mikrofónu a reproduktoru v případě a). Opět je změřena hladina akustického tlaku $L_{p,r}$ (obr. 14b).



Obr. 14: Schematické znázornění metody měření činitele zvukové pohltivosti odrazem zvuku [4].

Z naměřených hladin akustického tlaku je vypočítán činitel zvukové pohltivosti podle vztahu

$$\alpha_{\varphi, f} = 1 - 10^{\frac{(L_{p,d} - L_{p,r})}{10}}. \quad (29)$$

Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám a potřeba vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je nutnost použití směrového reproduktoru a mikrofónu pro zamezení snímání přímého neodraženého

zvuku. Další nevýhodou je potřeba dokonale odrazivé podložky s nulovou zvukovou pohltivostí. S tloušťkou zkušebního materiálu se mění geometrie soustavy [4].

Metoda měření intenzity zvuku

Při stanovení činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvukových vln lze použít metodu měření intenzity zvuku. Vzorek materiálu je umístěn v dozvukové komoře spolu se širokopásmovým zdrojem zvuku. Vzorek se nachází v poli odražených vln a činitel zvukové pohltivosti je dán vztahem

$$\alpha = \frac{4}{1 + 10^{0,1(L_p - L_I)}}, \quad (30)$$

kde L_p je průměrná hladina akustického tlaku a L_I je průměrná hladina intenzity zvuku.

Výhodou metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám. Nevýhodou je nepřesné měření intenzity zvuku [4].

Rezonanční frekvenci membrány je možno zjistit měřením s pomocí impedanční trubice. Činitel zvukové pohltivosti dosahuje nejvyšších hodnot právě při rezonanční frekvenci.

Zařízení pro stanovení a úpravu rezonanční frekvence jsou uvedena v následujících odstavcích. Avšak pro stanovení rezonanční frekvence membrány se nedají využít. Proto je vyvíjena metoda popisovaná v této práci ojedinělá.

V práci [28] je popisována metoda pro přibližné stanovení rezonanční frekvence struktury obklopené stlačitelnou tekutinou. Je provedena analýza ke stanovení frekvencí a stanovena část struktury, na kterou je analýza zaměřena. Výpočtem je určena vlastní frekvence vybrané části a je zjišťován rozdíl mezi původně zjištěnou a vypočtenou frekvencí.

Frekvenčně laditelný rezonanční skener je popsán v práci [29]. Mikroelektromechanické skenovací zařízení (MEM) má různé rezonanční frekvence. V jedné

částí je torzní rameno, které podpírá tělo oscilátoru. Určité množství hmoty je umístěno na oscilátoru a je selektivně odstraňováno k určení rezonanční frekvence. Další materiál je umístěn na torzním ramenu a změnou pozice mění mechanické vlastnosti. Změna mechanických vlastností mění rezonanční frekvenci torzního ramene. Jsou zde popsány různé postupy ke kontrole odezvy skenovacího zařízení včetně aktivní kontroly MEM zařízení a pasivního ladění frekvence.

V patentu [30] je popsána metoda úpravy rezonanční frekvence rezonátoru s množstvím vibračních módů. Nejprve je rezonátor nastaven na libovolnou teplotu, pak je změřena rezonanční frekvence základních vibrací. Poté je nastavena jiná teplota a opět změřena frekvence. Následuje vypočtení frekvenčně-teplotního koeficientu. Dodání nebo odstranění hmoty z definované vibrační části rezonátoru ovlivní koeficient. Takto je účinně nastavena rezonanční frekvence takovým způsobem, že se koeficient výrazně změní.

Metodou stabilizace rezonanční frekvence a rezonančního skeneru se zabývá práce [31]. Tepelná energie stejného množství jako teplo generované v optickém skenovacím modu je aplikována na část skeneru v nesnímácím režimu. To by mělo zajistit, že rozdílná teplota rezonujícího světelného deflektoru bude uvnitř předdefinovaného rozmezí, zatímco rezonanční frekvence oscilátoru odrážecího zrcadla je stabilizována.

3 METODA

Jak je uvedeno v kapitole 2.5.2.1 (Kmitající membrány), zvuková energie dopadající na rezonanční soustavu uvede membránu do nucených kmitů. Amplituda kmitů je maximální v případě rezonance a hodnota činitele zvukové pohltivosti je při rezonanční frekvenci nejvyšší. Pokud se tedy podaří určit, při kterých frekvencích membrána kmitá nejvíce, budou pravděpodobně zjištěny i frekvenční oblasti, ve kterých kmitající membrána zvukovou energii nejlépe pohltí.

3.1. Princip

Podstatou vyvíjené metody je stanovení rezonančních frekvencí membrány s pomocí zpracování obrazového záznamu, na kterém je zachycen pohyb kmitající membrány.

Vzorek nanovlákněné membrány je umístěn v měřícím zařízení. Zvukem pouštěným z reproduktoru je membrána uvedena do nuceného kmitání, přičemž amplituda kmitů je maximální v rezonanci.

Tento pohyb je snímán rychloběžnou kamerou a digitální záznam je následně zpracováván s pomocí programovacího jazyka MATLAB.

Vyhodnocení velikosti výchylek kmitů membrány nám umožňuje zjistit, která frekvence je pro danou membránu rezonanční a následně, při které frekvenci má membrána nejvyšší pohltivost.

3.2. Zařízení

Měřicí soustava se skládá z průhledné trubice s reproduktorem, z generátoru zvukového signálu, zesilovače, digitální rychlokamery Olympus (Systém i-SPEED3), zobrazovacího LCD displeje a osvětlení (viz obr. 15).

Zkušební vzorek se upevňuje do jednoho konce trubice. Dopadající rovinná sinusová zvuková vlna je buzena reproduktorem v opačném konci trubice. Superpozicí

dopadající vlny a odražené vlny od zkušebního vzorku vzniká v trubici stojatá vlna. Membrána začne po dopadu zvukového vlnění kmitat; její pohyb je snímán rychloběžnou digitální kamerou a zobrazován na LCD displeji. Obrazový záznam je následně zpracováván.

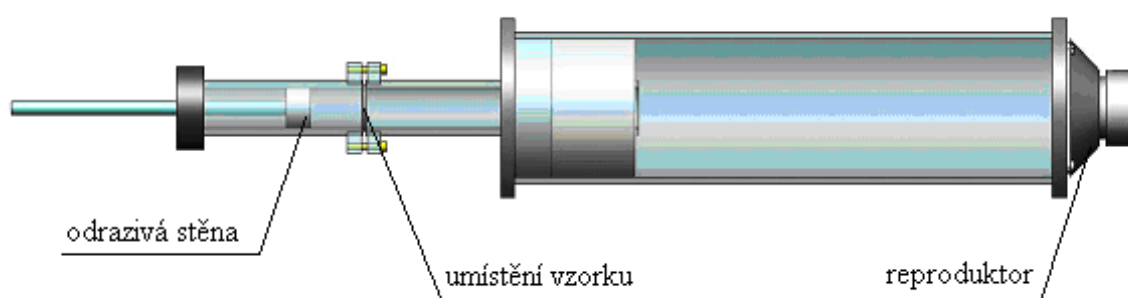


Obr. 15: Schéma měřicí soustavy [20, 21].

3.2.1. Trubice

Pro tento experiment byla sestrojena trubice z průhledného materiálu PMMA (polymetylmetakrylát) (obr. 16), aby bylo možno snímat pohyb membrány, která je vložena uvnitř trubice, rychlokamerou umístěnou vně.

Technický náčrt trubice viz příloha č. 1. Konstrukce trubice částečně vychází z dvou mikrofonové impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4602 (viz kapitola 2.7. Metody pro určování činitele zvukové pohltivosti).



Obr. 16: Schéma trubice s naznačeným umístěním vzorku, odrazivé stěny a reproduktoru.

V trubici menšího průměru je upevněn vzorek nanovláknenné membrány, za ním je umístěna odrazivá stěna ve formě nastavitelného pístu. V našem experimentu byl píst nastaven ve vzdálenosti 30 mm od vzorku. Vzorek je vložen mezi dvěma díly této trubice a upnut s pomocí dvou šroubů spojujících oba díly trubice.

Zvuk se šíří ze zdroje (reproduktor umístěný na konci trubice velkého průměru) jako rovinná sinusová vlna; prochází trubicí o velkém průměru do trubice o menším průměru. Superpozicí dopadající a odražené vlny od zkušebního vzorku vzniká v trubici stojatá vlna. Technické parametry reproduktoru viz příloha č. 3.

3.2.2. Digitální vysokorychlostní kamerový systém

Digitální vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED3 (obr. 17) je kamera určená pro záznam velmi rychlých dějů rychlostí až několik desítek tisíc snímků za sekundu. Kamera byla vyvinuta japonskou společností OLYMPUS Optical Co. Ltd.



Obr. 17: Digitální rychlokamera Olympus i-speed3 a kontrolní LCD display. Čerpáno z [20, 21].

Při rychlosti snímání, resp. snímovací frekvenci 2000 snímků za sekundu kamera dosahuje maximálního rozlišení obrazu 1280 x 1024 obrazových bodů. Kamera umožňuje také snímání vyšší frekvencí až do 150 000 snímků za sekundu. S rostoucí snímovací frekvencí se však (při zachování velikosti snímaného obrazu) zmenšuje rozlišení obrazového záznamu. Snímovací frekvence a odpovídající rozlišení, které lze na kameře nastavit, jsou uvedeny v tabulce 2. Při snímání děje je potom nutné zvolit kompromis mezi nastavenou frekvencí a jí odpovídajícím rozlišením tak, aby snímané děje byly v dostatečné kvalitě pro další zpracování. Je tedy zřejmé, že možnosti kamery z hlediska rychlosti snímání nejsou vždy zcela využity (při nejvyšší frekvenci snímání by byl záznam nekvalitní a pro další zpracování nepoužitelný) [22, 23].

Kvalitu záznamu je možné výrazně ovlivnit intenzitou osvětlení. Proto je při snímání během experimentu třeba použít výkonná halogenová svítidla nebo synchronizovanou soustavu blesků.

Natáčené děje lze synchronizovat s funkcí kamery různými způsoby - například s časovacím zařízením elektronického odpalování s výstupním signálem v úrovni tranzistorové logiky TTL 5V, nebo jednoduchými optickými nebo akustickými čidly, reagujícími na záblesk nebo hluk, popř. optickými hradly spouštěnými průletem

předmětu (např. střely) před jeho dopadem na zkušební blok. Uplatnění některého z uvedených principů automatického startu záznamu kamery je zvláště důležité pro bezpečnost obsluhy kamery například při střelbě (kamera se nachází v ohroženém prostoru před zbraní) i pro dosažení optimálního okamžiku pro start záznamu a případného spouštění zábleskových zařízení (blesků).

Tab. 2: Rozlišení záznamu a další parametry digitální kamery Olympus i-SPEED2 v závislosti na snímkovací frekvenci (frekvenci snímání) [23].

Frekvence snímání [s ⁻¹]	1 000	3 000	6 000	8 000	10 000	15 000	20 000	33 000
Rozlišení X [bod]	800	448	288	256	224	160	128	96
Rozlišení Y [bod]	600	336	216	192	168	120	96	72
Zoom	1:1	1:1,8	1:2,8	1:3,1	1:3,6	1:5	1:6,3	1:8,3
Max. expoziční čas [μs]	1000	333	166	125	100	66,7	50,0	30,3

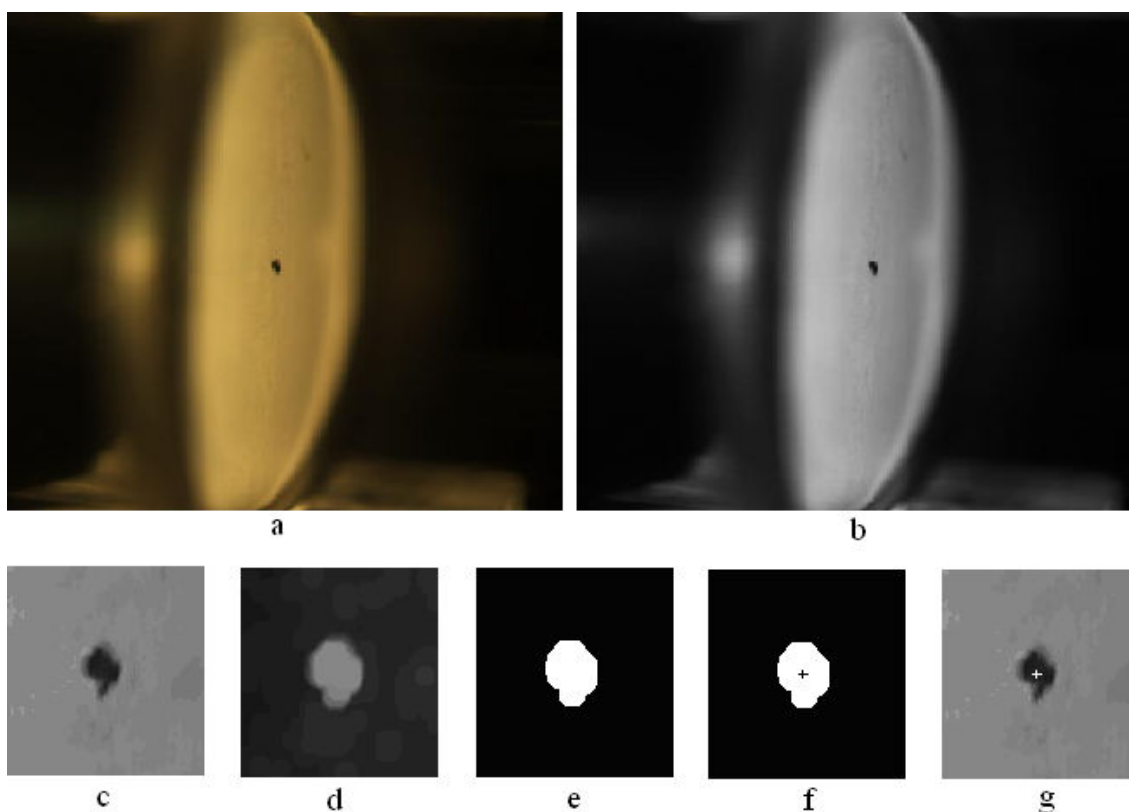
Záznam snímaného děje je ukládán na paměťovou kartu (podobnou jako v digitálním fotoaparátu) s kapacitou 1/2/4/8/16 GB, odkud může být soubor snadno transportován do počítače. Kameru lze spojit také přímo s PC, na jehož pevný disk se po každém snímaném ději příslušný záznam uloží. Po nasnímání děje lze uložený záznam okamžitě prohlížet i analyzovat s využitím software i-SPEED dodávaného k systému [22, 23].

Hlavními složkami systému, který jsme použili při našem experimentu, jsou digitální rychlokamera (Olympus - Systém i-SPEED3) a zobrazovací LCD panel 8,4". V našem experimentu je použito snímání 1000 obr/s při nastaveném rozlišení 1280 x 1024 pixelů, přičemž každý záznam má rozsah 100 snímků, tedy 0,1 s. Ve středu každého vzorku je nakreslena značka, na kterou je objektiv kamery zaostřen. Pohyb této značky je kamerou snímán.

3.3. Zpracování obrazového záznamu

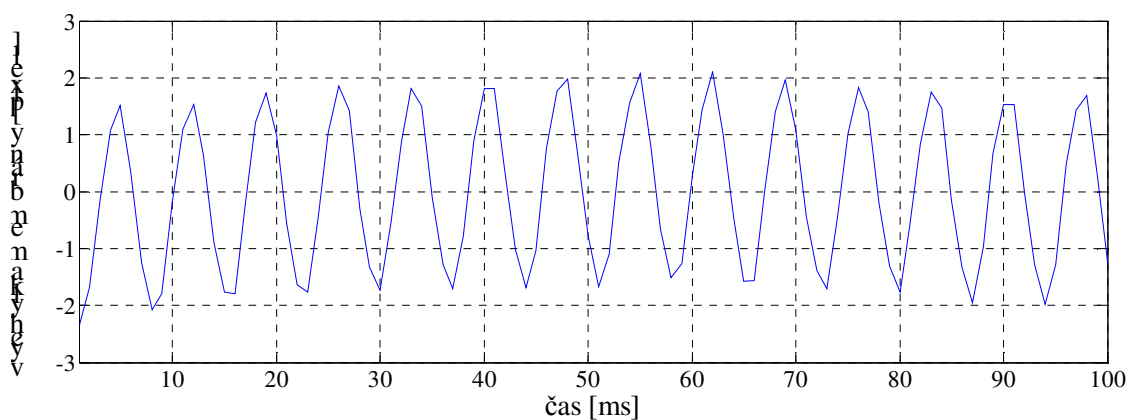
Výstup z kamery je v podobě videa ve formátu *.hsv (hue-saturation-value). Tento formát je převeden na typ *.avi (Audio/Video Interleaved).

Videozáznam je zpracováván programovacím jazykem MATLAB. Každý snímek záznamu (obr. 18a) je nejprve převeden z barevného modelu RGB na odstíny šedé (obr. 18b). Dále je nutno ručně vymezit oblast kolem sledované značky, která bude následně zpracovávána (obr. 18c). Tato oblast je převedena na negativ a je na ni aplikována metoda dilatace, která způsobí rozšíření (rozmazání) obrysů a odstraní tím případné nerovnosti (obr. 18d). Další zpracování obrazu spočívá v převedení šedých odstínů do dvou barev – černé a bílé (obr. 18e). Následuje nalezení těžiště značky (obr. 18f), které je pak označeno v původním monochromatickém snímku křížkem (obr. 18g).



Obr. 18: Postup při zpracování obrazového záznamu

Pozice těžiště odpovídá v každém okamžiku výchylce membrány. Časový průběh této výchylky je vyneseno v grafu (viz obr. 19).

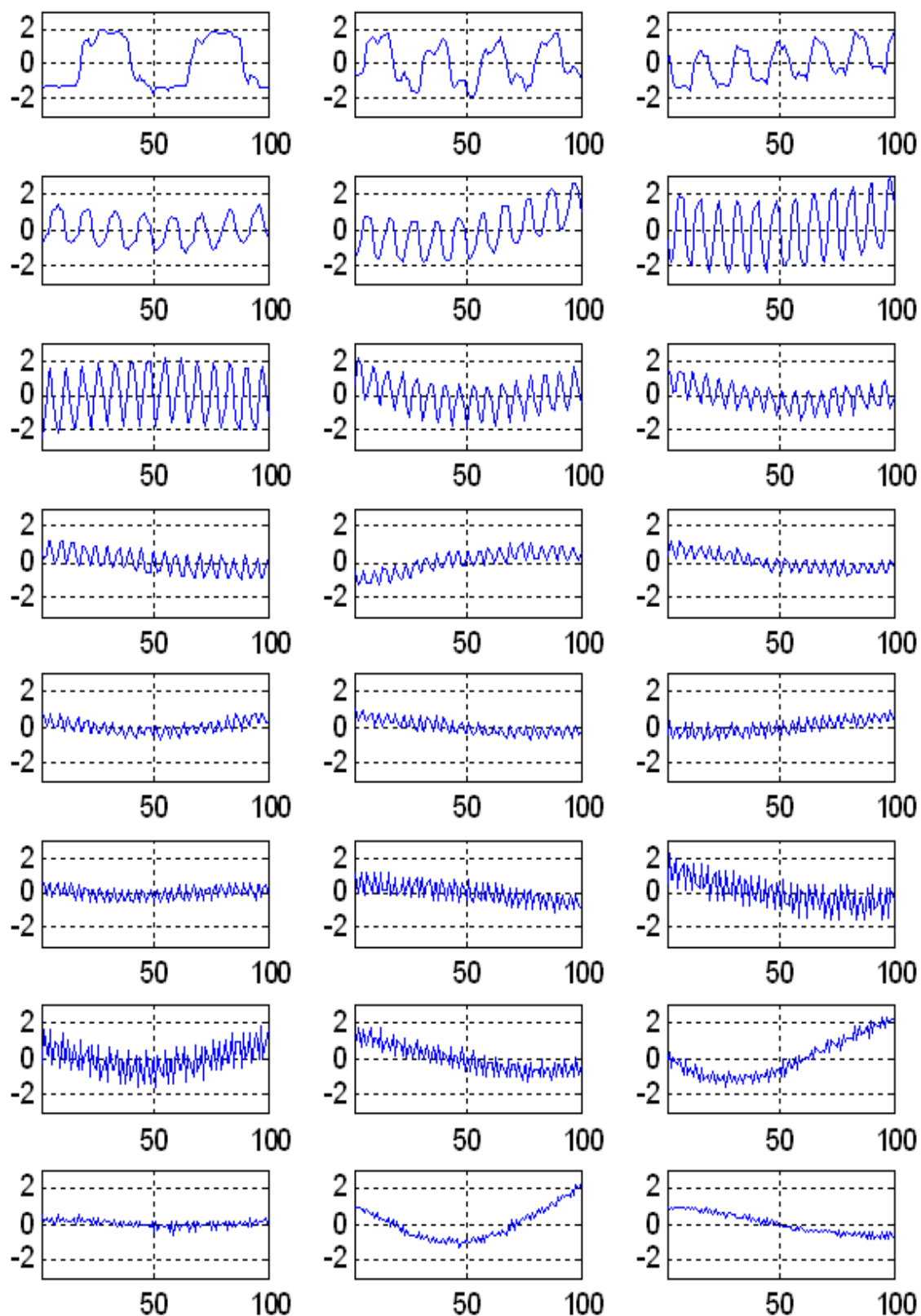


Obr. 19: Závislost výchylky membrány na čase pro frekvenci 140 Hz, vzorek A (plošná hmotnost $16,6 \text{ g.m}^{-3}$)

V obrázku 20 jsou zobrazena jednotlivá měření pro frekvence v rozsahu 20 – 480 Hz s krokem 20 Hz. Hodnoty frekvencí pro jednotlivá měření jsou shrnuty v následující tabulce 3 a nejsou již uvedeny u jednotlivých grafů v obrázku 20. Pozice buněk v tabulce odpovídají pozicím grafů v obrázku.

Tab. 3: Schéma rozvržení grafů pro dané hodnoty frekvencí

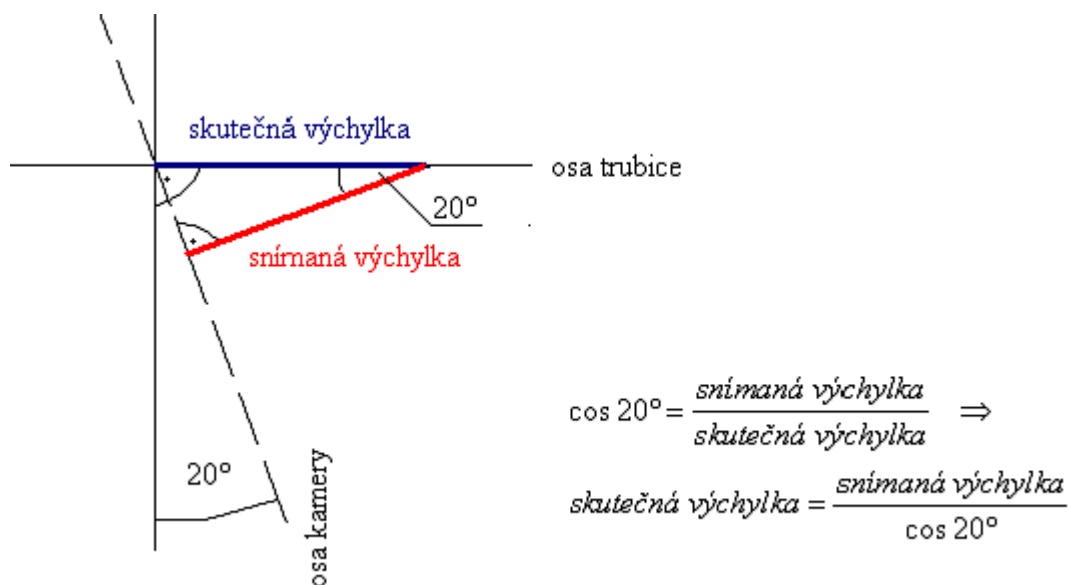
1	20 Hz	40 Hz	60 Hz
2	80 Hz	100 Hz	120 Hz
3	140 Hz	160 Hz	180 Hz
4	200 Hz	220 Hz	240 Hz
5	260 Hz	280 Hz	300 Hz
6	320 Hz	340 Hz	360 Hz
7	380 Hz	400 Hz	420 Hz
8	440 Hz	460 Hz	480 Hz



Obr. 20: Závislost výchylky membrány na čase pro různé frekvence (20 – 480 Hz), vzorek A (plošná hmotnost $16,6 \text{ g.m}^{-3}$). Na osách x je vynesěn čas v milisekundách, na osách y jsou vyneseny výchylky membrány v pixelech.

Aby bylo možné věrohodně zachytit pohyb kmitající membrány kamerou, není možné snímat vzorek ze směru kolmého k ose trubice (není možné přesně zachytit pohyb značky na membráně). Proto kamera snímala vzorek pod úhlem 20°, který se zdál být optimálním.

Pro výpočet skutečné výchylky membrány je třeba použít vztahu uvedeného na obrázku 21.

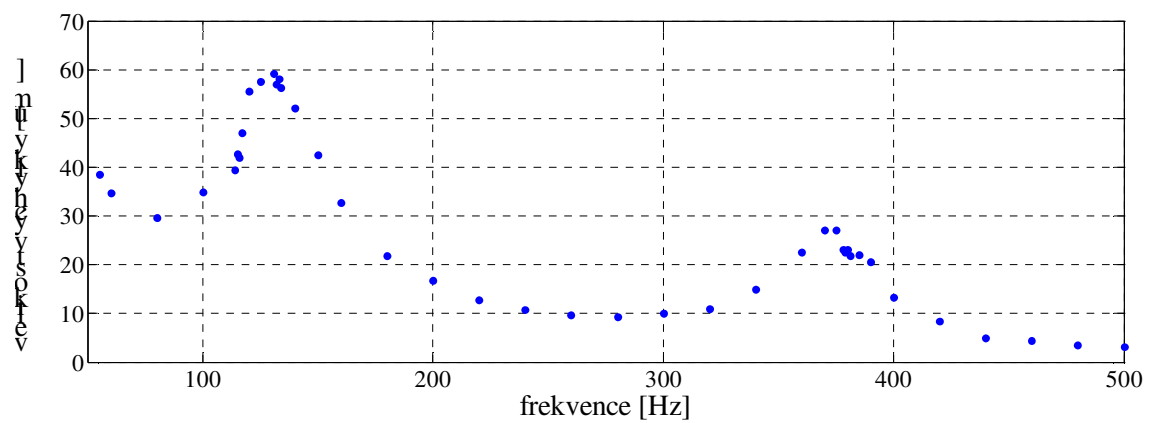


Obr. 21: Schéma pro výpočet skutečné výchylky membrány

Z videozáznamu bylo odečteno, že jeden obrazový pixel odpovídá přibližně 29 μm. Pro výpočet skutečné výchylky membrány v μm je tedy nutno velikost výchylky v pixelech vynásobit hodnotou 29.

Vzhledem k tomu, že membrána nekmitá pouze jednou frekvencí, ale jedná se o pohyb složený z několika frekvencí (viz např. frekvence 420 Hz na obr. 18), nebylo možno určit výchylku kmitu jednoduše odečtením maximální a minimální naměřené hodnoty. Byla proto stanovena velikost maximální výchylky pro každou periodu. Jako výsledná výchylka byla určena průměrná hodnota těchto výchylek.

Frekvenční závislost vypočtených výchylek je vykreslena v grafu (viz obr. 22).



Obr. 22: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek A

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Cíl

Cílem měření bylo zjistit rezonanční frekvence nanovláknenných membrán o různých plošných hmotnostech (16,6; 8,3; 4,2; 2,8; 2,1 g.m⁻²) s pomocí vyvíjené optické metody a zjistit vliv plošné hmotnosti na hodnoty rezonanční frekvence.

4.2. Úkoly

Aby bylo dosaženo stanoveného cíle, musely být splněny tyto úkoly:

- 1) výroba zkušebních vzorků z nanovláknenné membrány, nakreslení značky pro zaostření objektivu na každý vzorek,
- 2) vkládání jednotlivých vzorků do měřicího zařízení,
- 3) sledování a snímání průběhu kmitů během změny frekvence zvuku,
- 4) zpracování obrazového záznamu,
- 5) vyhodnocení výsledků.

4.3. Výroba vzorků

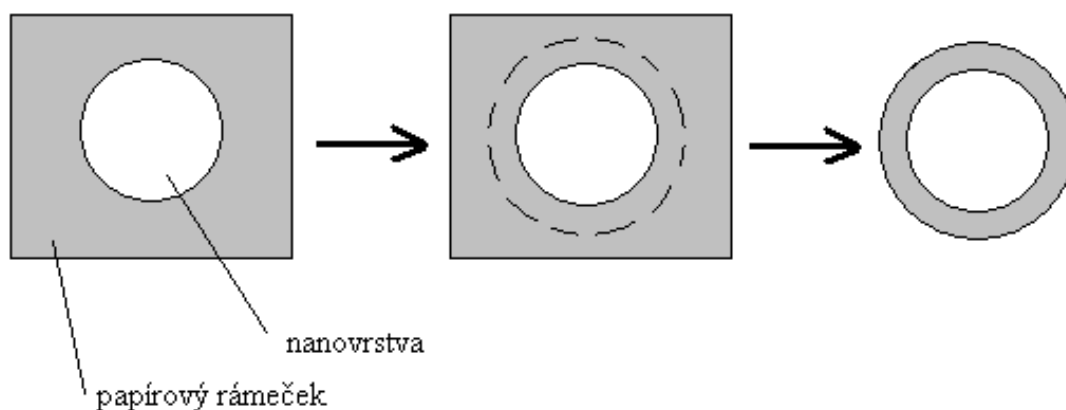
Pro výrobu membrány byla použita nanovláknenná vrstva zhotovená elektrostatickým zvlákněním směsi 16%-ního roztoku polyvinylalkoholu s přídavkem 40%-ního glyoxalu, 85%-ní kyseliny fosforečné a vody (viz příloha č. 4).

Zhotovení nanovláknenné vrstvy proběhlo na laboratorním zařízení Nanospider. Plošná hmotnost zvlákněné vrstvy nanovláken byla regulována odtahovou rychlostí podkladového materiálu. Takto bylo vytvořeno pět různých plošných hmotností nanovláknenné vrstvy – viz tabulka 4.

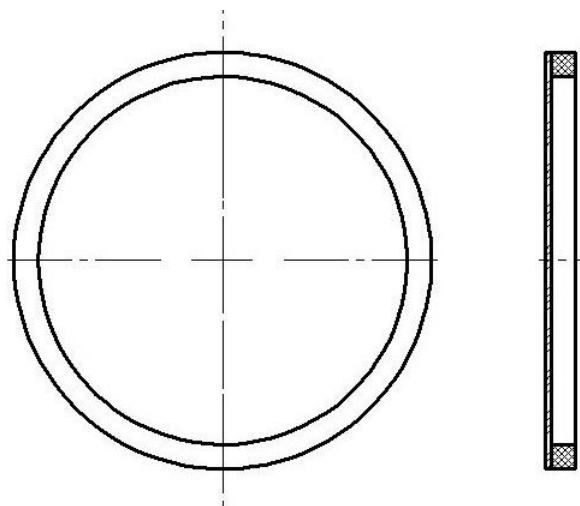
Tab. 4: Plošné hmotnosti vzorků s odpovídající odtahovou rychlostí a frekvencí

plošná hmotnost [g.m ⁻²]	odtahová rychlost [m.min ⁻¹]	odtahová rychlost [Hz]
16,6	0,04	2,5
8,3	0,08	5
4,2	0,16	10
2,8	0,24	15
2,1	0,32	20

Nanovláknenná vrstva byla zvlákněna na podkladový pečící papír s předem upevněnými papírovými rámečky s vyraženými kruhovými otvory o průměru 30 mm. Použití pečícího papíru sloužilo k následnému snazšímu sejmutí nanovrstvy z podkladu. Z rámečků byly poté vyrobeny zkušební vzorky vyražením kruhového otvoru o větším průměru (34 mm) tak, že vznikl vzorek ve tvaru papírového mezikruží pokrytého nanovláknennou vrstvou (viz obr. 23 a 24). Na každý vzorek byla do středu nakreslena značka, na kterou byl při experimentu zaostřen objektiv.



Obr. 23: Výroba vzorku



Obr. 24: Nákras vzorku

4.3.1. Označování vzorků

Označování vzorků různých plošných hmotností:

„A“ → vlákenná vrstva odpovídající plošné hmotnosti $16,6 \text{ g.m}^{-2}$

„B“ → vlákenná vrstva odpovídající plošné hmotnosti $8,3 \text{ g.m}^{-2}$

„C“ → vlákenná vrstva odpovídající plošné hmotnosti $4,2 \text{ g.m}^{-2}$

„D“ → vlákenná vrstva odpovídající plošné hmotnosti $2,8 \text{ g.m}^{-2}$

„E“ → vlákenná vrstva odpovídající plošné hmotnosti $2,1 \text{ g.m}^{-2}$

4.4. Použité měřicí zařízení

Měřicí soustava se skládá z průhledné trubice s reproduktorem, z generátoru zvukového signálu, zesilovače, digitální rychlokamery Olympus (Systém i-SPEED3), zobrazovacího LCD displeje a osvětlení (viz oddíl 3 Metoda, odstavec 3.2. Zařízení). Většina experimentů proběhla ve VÚTS a.s., část v poloprovoze Katedry netkaných textilií.

4.5. Postup experimentu

Jednotlivé zkušební vzorky nanovlákněné membrány byly postupně vkládány do měřicího zařízení. Z důvodů částečné eliminace chyby měření, způsobené manipulací se vzorky a jejich nestejnoměrností, bylo proměřeno od každé plošné hmotnosti pět kusů vzorků.

Pro každý vzorek bylo zvoleno rozmezí snímaných frekvencí 0 - 500 Hz. Aby bylo možno objektivně vyhodnotit pohyb kmitající membrány, je nutno použít alespoň dvojnásobnou snímkovací frekvenci kamery než je frekvence kmitání této membrány. Naším předpokladem je, že membrána kmitá se stejnou frekvencí jako zvukové vlnění vycházející z reproduktoru. Při záznamu 1000 snímků za sekundu (snímkovací frekvence použité kamery) je tedy možné sledovat kmitavý pohyb membrány s maximální frekvencí 500 Hz.

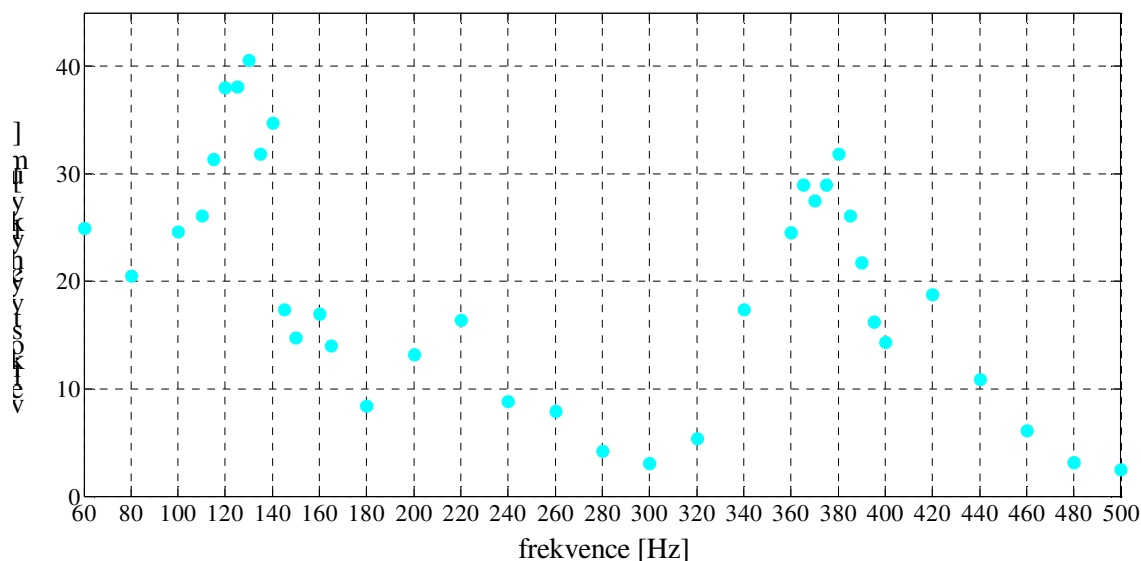
Cílem experimentu bylo určení rezonanční frekvence membrány. Nejprve byl tedy proměřen celý rozsah frekvencí 0 – 500 Hz s krokem 20 Hz pro získání hrubého odhadu rezonančních frekvencí. Po předběžném vyhodnocení obrazového záznamu byly dále podrobněji proměřovány frekvenční oblasti, ve kterých membrána kmitala nejvíce.

4.6. Výsledky experimentu a vyhodnocení

Postupně bylo proměřeno pět vzorků od každé plošné hmotnosti (16,6; 8,3; 4,2; 2,8; 2,1 g.m⁻²). Získané digitální záznamy ze všech měření byly vyhodnoceny s pomocí programovacího jazyka MATLAB. Postup byl podrobně popsán v kapitole 3.3.

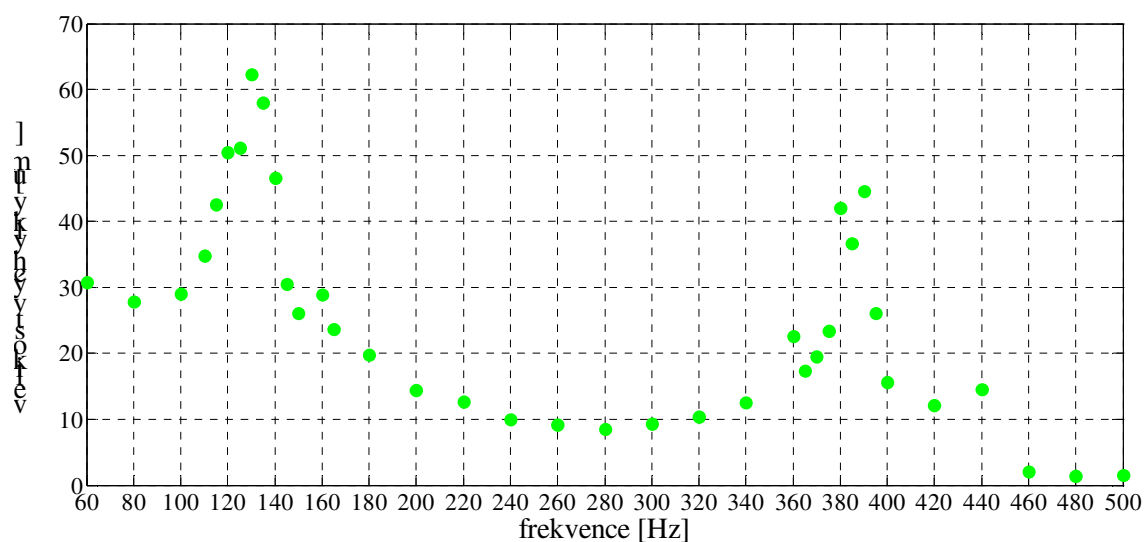
Následující grafy (obr. 25 – 30) zobrazují závislost výchylky membrány na frekvenci pro jednotlivé plošné hmotnosti. V grafu na obrázku 30 jsou vyneseny frekvenční závislosti výchylek pro všechny plošné hmotnosti.

Vzhledem k tomu, že frekvenční rozsah reproduktoru je 60 – 20 000 Hz (viz příloha č. 3), oblast pod 60 Hz nelze objektivně vyhodnotit.



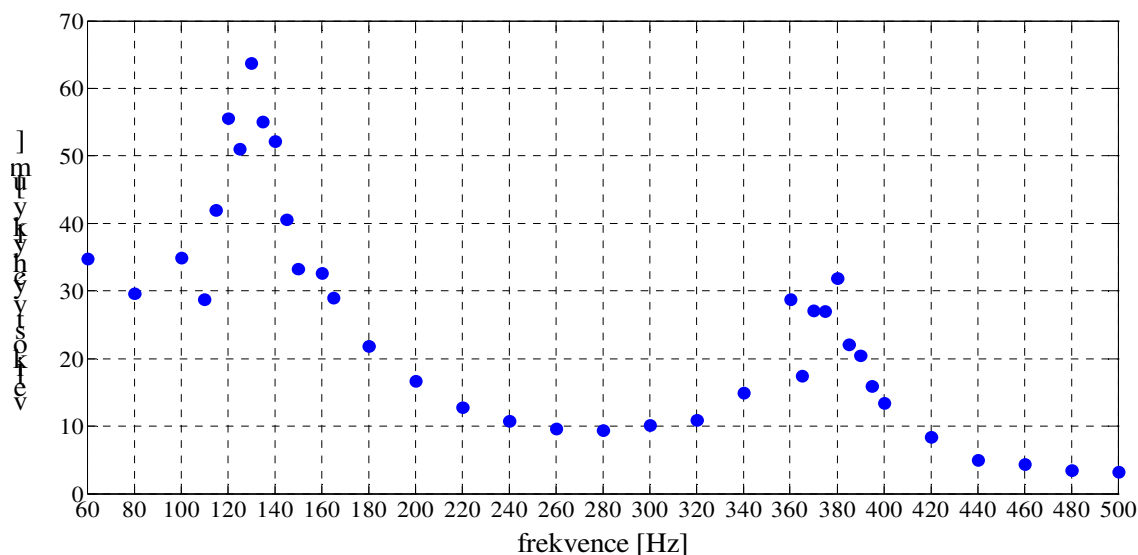
Obr. 25: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek A.

V grafu na obrázku 25 je zobrazena výsledná frekvenční závislost vzorku A ($16,6 \text{ g.m}^{-2}$). Je patrné, že membrána dosahuje maximální výchylky $40,6 \text{ μm}$ v okolí 130 Hz. Další maximum je na frekvenci 375 Hz a výchylky má velikost 29 μm .



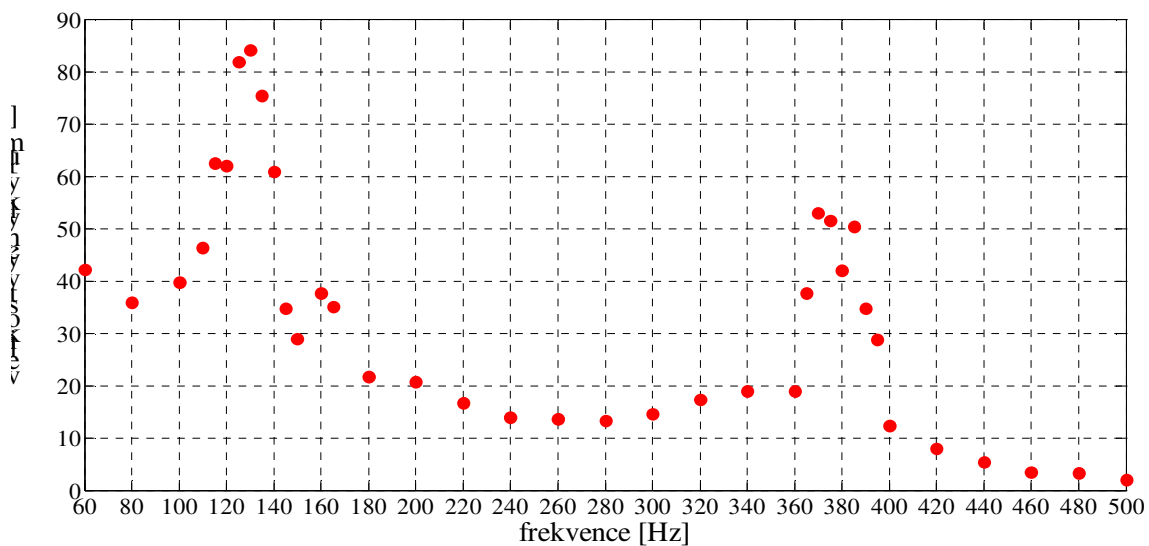
Obr. 26: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek B.

Obrázek 26 zobrazuje graf výsledné frekvenční závislosti vzorku B ($8,3 \text{ g.m}^{-2}$). Membrána dosahuje maximální výchylky $59,4 \text{ μm}$ v okolí 130 Hz. Frekvence 390 Hz je dalším maximem s velikostí výchylky $44,6 \text{ μm}$.



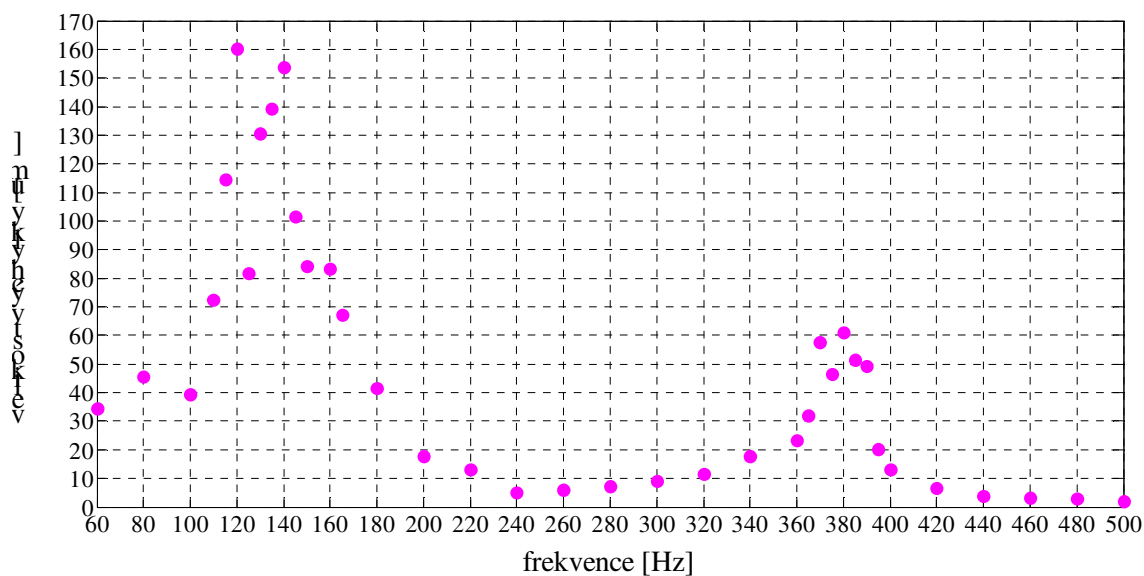
Obr. 27: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek C.

V grafu na obrázku 27 je zobrazena výsledná frekvenční závislost vzorku C ($4,2 \text{ g.m}^{-2}$). Je patrné, že membrána dosahuje maximální výchylky $63,8 \text{ μm}$ v okolí 130 Hz. Další maximum je na frekvenci 380 Hz a má velikost $31,9 \text{ μm}$.



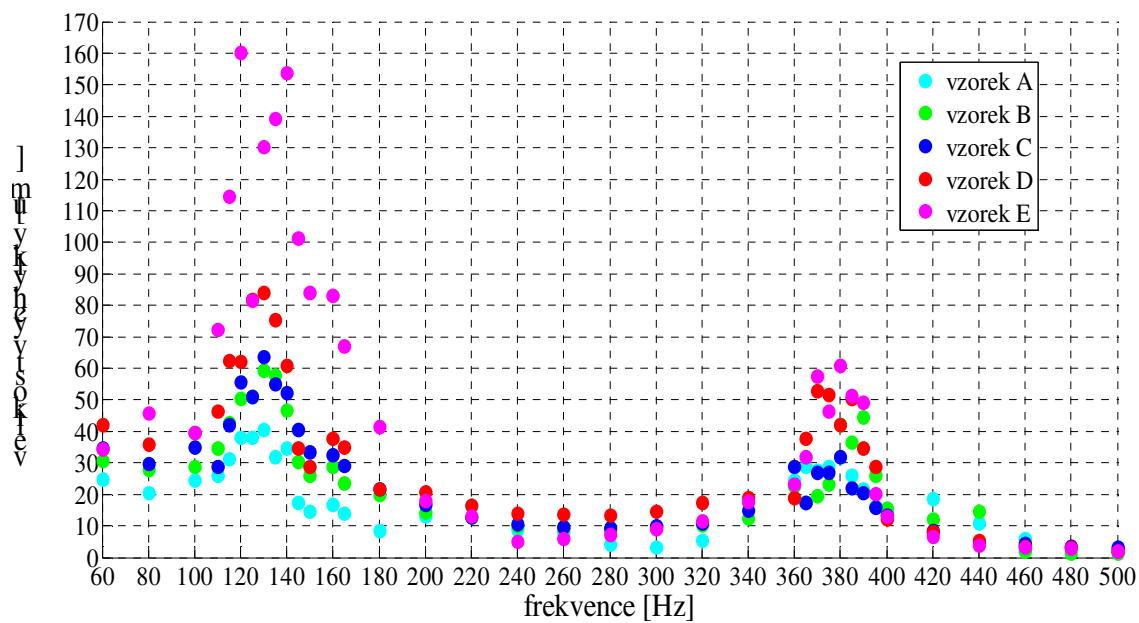
Obr. 28: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek D.

Obrázek 28 zobrazuje graf výsledné frekvenční závislosti vzorku D ($2,8 \text{ g.m}^{-2}$). Membrána dosahuje maximální výchylky $84,1 \text{ μm}$ v okolí 130 Hz. Frekvence 370 Hz je další maximum a má velikost 53 μm .



Obr. 29: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro vzorek E.

V grafu na obrázku 29 je zobrazena výsledná frekvenční závislost vzorku E ($2,1 \text{ g.m}^{-2}$). Je patrné, že membrána dosahuje maximální výchylky $160,3 \text{ μm}$ v okolí 120 Hz. Další maximum je na frekvenci 380 Hz a má velikost $60,9 \text{ μm}$.



Obr. 30: Závislost velikosti výchylky kmitů na frekvenci pro všechny vzorky.

Obrázek 30 je souhrnným grafem pro všech pět plošných hmotností. Veškeré vzorky vykazují významnější velikost výchylky ve dvou frekvenčních oblastech. První oblast je od 120 do 130 Hz, druhá leží v rozmezí 370 až 390 Hz. Tyto dvě oblasti mohou být označeny jako rezonanční frekvence pro daný rozsah 60 – 500 Hz.

První oblast rezonanční frekvence se u jednotlivých vzorků výrazně neliší - pro vzorky A - D je tato frekvence 130 Hz, jen u vzorku E je zjištěna odlišná hodnota 20 Hz. Zde vliv plošné hmotnosti není zřejmý. V druhé oblasti se rezonanční frekvence odlišuje vzorek od vzorku bez jasného vlivu plošné hmotnosti. Nejnížší hodnota 370 Hz náleží ke vzorku D, nejvyšší (390 Hz) byla zjištěna u vzorku B.

Naopak velikost výchylky je plošnou hmotností výrazně ovlivněna, jak je patrné z obrázku 27. V první oblasti rezonanční frekvence (120 – 130 Hz) se velikost výchylky zvyšuje s klesající plošnou hmotností. Velikost výchylky se u vzorků A – D postupně zvyšuje, mezi vzorkem D a E je znát mnohem větší rozdíl mezi hodnotami. Pro vzorek E je velikost výchylky 160,3 μm , což je přibližně dvojnásobek výchylky vzorku D (84,1 μm). V druhé rezonanční oblasti (370 – 390 Hz) je tento trend obdobný, velikost výchylky se s klesající plošnou hmotností také zvyšuje. Vybočuje jen vzorek C, jehož výchylka je menší než u vzorku B.

Odchytky a rozdíly v průběhu závislosti velikosti výchylky na frekvenci mohou být dány nestejnoměrností nanovlákněné vrstvy, popř. upínáním vzorku v měřícím zařízení. Vliv těchto parametrů byl částečně eliminován měřením pěti vzorků od každé plošné hmotnosti.

V proměřovaném frekvenčním rozsahu 60 – 500 Hz byly pro všechny vzorky nalezeny dvě oblasti s významně větší výchylkou membrány – dvě rezonanční frekvence. Z výsledků experimentu vyplývá, že s rostoucí plošnou hmotností se velikost výchylky snižuje, kdežto vliv na hodnoty rezonanční frekvence není zcela zřejmý.

5 ZÁVĚR

V této práci je popsána vyvíjená metoda pro optické stanovení rezonanční frekvence membrány a dále je zjišťován vliv plošné hmotnosti na rezonanční frekvenci nanovlákněné membrány.

Podstatou metody je stanovení rezonanční frekvence membrány zpracováním obrazového záznamu, na kterém je zachycen pohyb kmitající membrány. Měřicí soustava se skládá z průhledné trubice s reproduktorem, z generátoru zvukového signálu, zesilovače a digitální rychlokamery.

Zkušební vzorek nanovlákněné membrány je upevněn v trubici a v opačném konci trubice je reproduktorem buzena zvuková vlna. Membrána začne po dopadu zvukového vlnění kmitat a její pohyb snímá rychloběžná digitální kamera. Obrazový záznam je následně zpracováván s pomocí programovacího jazyka MATLAB.

Touto metodou bylo proměřeno pět plošných hmotností nanovlákněné vrstvy (16,6; 8,3; 4,2; 2,8; 2,1 g.m⁻²) vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu.

V proměřovaném frekvenčním rozsahu 60 – 500 Hz byly pro všechny vzorky nalezeny dvě oblasti s významně větší výchylkou membrány – dvě rezonanční frekvence. První oblast je od 120 do 130 Hz, druhá leží v rozmezí 370 až 390 Hz. Z výsledků experimentu vyplývá, že s rostoucí plošnou hmotností se velikost výchylky snižuje, kdežto vliv na hodnoty rezonanční frekvence není zcela zřejmý.

Vyvíjená metoda se ukázala jako funkční a použitelná. Protože tato metoda vychází ze zpracování obrazového záznamu, jsou parametry zařízení, kterým je záznam snímán, určující. Rozlišení a snímkový frekvence digitální kamery vymezují rozsah frekvencí zvuku, ve kterém může být zkoušený vzorek měřen. Zatímco při zjišťování akustických charakteristik s pomocí impedanční trubice je měření možno provádět až do frekvence 6 400 Hz, tato metoda je omezena na nižší frekvence (cca do 500 - 1000 Hz, dle typu kamery).

Další vývoj by mohl být směřován k experimentům v pásmech vyšších frekvencí a zjišťování, do jakých maximálních frekvencí je metoda pro optické stanovení

rezonanční frekvence membrány optimálně použitelná. Také bych doporučila porovnání výsledků této metody s výsledky z experimentů prováděných s pomocí impedanční trubice.

6 LITERATURA

Seznam použité literatury:

- [1] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠENDELÁŘ, V.: *Technická fyzika*. 3. vydání. Praha: SNTL, 1961. 1432 s.
- [2] JIRSÁK, O., KALINOVÁ, K.: *Netkané textilie*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. 129 s. ISBN 80-7083-746-2.
- [3] KAŇKA, J.: *Akustika v architektuře*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. 190 s. ISBN 80-01-01188-7
- [4] KALINOVÁ, K.: *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury*. [Disertační a habilitační práce]. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 86 s. ISBN 80-7083-997-X.
- [5] KOLMER, F., KYNCL, J.: *Prostorová akustika*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1980. 244 s. ISBN 04-514-80.
- [6] KREBSOVÁ, M.: *Nauka o polymerech*. Liberec: VŠST, 1979. 223 s.
- [7] MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL, K. a kol.: *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky*. 1. vydání. Praha: Prometheus, 1999. 588 s. ISBN 80-7196-151-5
- [8] MILITKÝ, J.: *Textilní vlákna: Klasická a speciální*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 238 s. ISBN 80-7083-644-X.
- [9] NOVÝ, R.: *Hluk a otřesy*. Vydavatelství ČVUT, 1994. 64 s. ISBN 80-01-00101-6
- [10] RŮŽIČKOVÁ, J.: *Elektrostatické zvláknění nanovláken*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. 54 s. ISBN 80-7083-867-1
- [11] SVOBODA, E. a kol.: *Přehled středoškolské fyziky*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1991. 588 s. ISBN 80-04-22435-0.
- [12] ŠKVOR, Z.: *Akustika a elektroakustika*. 1. vydání. Praha: Akademia, 2001. 527 s. ISBN 80-200-0461-0.
- [13] *Akustika*. [online]. [cit. 19.12. 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Akustika>>
- [14] *Hluk*. [online]. [cit. 19.12. 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Hluk>>

- [15] *Odraz vlnění*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: http://cs.wikipedia.org/wiki/Odraz_vln%C4%9Bn%C3%AD
- [16] *Rezonance*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonance>
- [17] *Zvuk*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zvukov%C3%A9_vln%C4%9Bn%C3%AD
- [18] *Polymeric Nanofibers and Nanofiber Webs: A New Class of Nonwovens*. [online] [cit. 2008-12-19] Dostupné na World Wide Web: <http://www.donaldson.com/en/filtermedia/support/datalibrary/052025.pdf>
- [19] *A method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and device for carrying out the method (WO/2005/024101)*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=2005024101&IA=CZ2004000056&DISPLAY=STATUS>
- [20] *i-SPEED3*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-3/>
- [21] *i-SPEED Control Methods*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-3/i-speed-control-methods/>
- [22] *i-SPEED Specifications Comparison*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-specifications/>
- [23] *Popis kamery*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.rucevzhuru.cz/video/popis/olympus.htm>
- [24] ISO 10534-1, ČSN 730501. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. 1999.
- [25] ISO 10534-2, ČSN 730501. Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 2: Metoda přenosové funkce. 2000.
- [26] ISO 354, ČSN 730535. Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. 2003.
- [27] *Dozvuk a jeho měření*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web:

http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/AKU_DOZVUK.pdf

- [28] *A method for determining the approximate resonance frequency of a structure surrounded by a compressible fluid (US 5686667)*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.google.com/patents?id=IX8aAAAAEBAJ&dq=determining+resonance+frequency>
- [29] *Frequency tunable resonant scanner and method of making (PCT/US2000/030411, US 6245590)*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=2002037164>
- [30] *Method of adjusting resonant frequency of a coupling resonator (US 4484382)*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.google.com/patents?id=t1kvAAAAEBAJ&dq=Method+of+adjusting+resonant+frequency+of+a+coupling+resonator>
- [31] *Method of stabilizing resonant frequency and resonant scanner using the same (US 5247384)*. [online]. [cit. 2008-12-19]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.patentstorm.us/patents/5247384/fulltext.html>

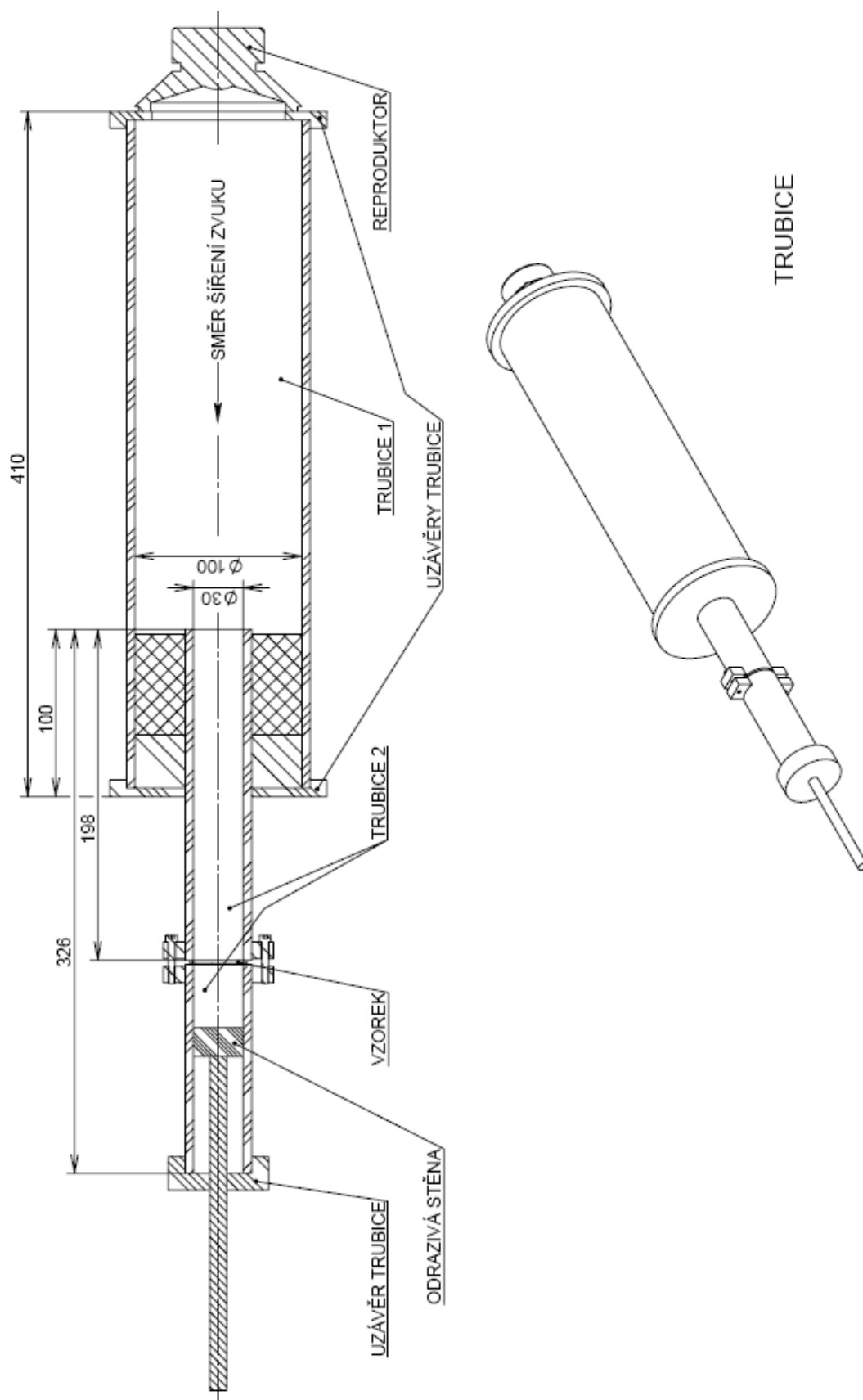
Další literatura:

- [a] BREPTA, R., PŮST, L., TUREK, F.: *Mechanické kmitání*. 1. vydání. Praha: Sobotáles, 1994. 592s. ISBN 80-901684-8-5.
- [b] HASSALL, J. R., ZAVERI, K.: *Acoustic noise measurements (Brüel & Kjaer)*. 1. vydání. Glostrup, Dánsko. 1998. 310 s. ISBN 87 87355 21 3.

7 SEZNAM PŘÍLOH

- 1.) Technický náčrtek trubice
- 2.) Technické parametry kamery Olympus i-speed3
- 3.) Technické parametry reproduktoru
- 4.) Složení zvláknovacího roztoku PVA

Příloha č. 1



Příloha č. 2

Technické parametry kamery:

- typ kamery: i-SPEED3 Olympus
- obrazový senzor: CMOS barevný nebo monochromatický
- počet snímaných bodů při plném rozlišení: 1280 x 1024 snímků/sec.
- obrazová frekvence - při plném rozlišení: 2 000 obr/sec
 - při redukovaném rozlišení: 150 000 obr/sec
- záznamová doba 8 sec
- paměťové médium Compact Flash 1GB, 2GB, 4GB, 8GB, 16GB
- napájení 12V DC/220 V AC
- rozměry 112mm (š) x 141mm (v) x 341mm (d)
- hmotnost včetně baterie 5 kg
- velikost pixelu 21 μm

Příloha č. 3

Technické parametry reproduktoru:

Odpor 4 [Ω]

Výkon 60 [W]

Frekvenční rozsah 60 – 20 000 [Hz]

Příloha č. 4

Složení zvlákněvaného roztoku polyvinylalkoholu:

500 ml.....Polyvinylalkohol PVA (16 %)

4,8 ml.....Glyoxal $C_2H_2O_2$ (40%)

2,5 ml.....Kyselina fosforečná H_3PO_4 (85 %)

120 ml.....Destilovaná voda H_2O